

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO

**Evolução Espaço Temporal do Uso de Cobertura de
Terra e a Suscetibilidade do Município de Angra dos
Reis aos Escorregamentos de terra**

Ana Carolina de Souza Ferreira

2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DO USO DE COBERTURA DE
TERRA E A SUSCETIBILIDADE DO MUNICÍPIO DE ANGRA DOS
REIS AOS ESCORREGAMENTOS DE TERRA**

ANA CAROLINA DE SOUZA FERREIRA

Sob orientação do Professor
Marcos Bacis Ceddia

e Co-orientação do Professor
Mauro Antonio Homem Antunes

Dissertação submetida como
requisito parcial para obtenção do
grau de **Mestre**, no Curso de Pós-
Graduação em Agronomia, Área de
Concentração em Ciência do Solo

Seropédica – RJ
Fevereiro de 2016

631.4098153

F368e

T

Ferreira, Ana Carolina de Souza, 1987-

Evolução espaço temporal do uso de cobertura de terra e a suscetibilidade do município de Angra dos Reis aos escorregamentos de terra / Ana Carolina de Souza Ferreira – 2016.

84 f.: il.

Orientador: Marcos Bacis Ceddia.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo.

Bibliografia: f. 56-60.

1. Ciência do solo – Angra dos Reis(RJ) – Teses. 2. Solo – Uso – Teses. 3. Mapeamento do solo – Teses. 4. Solos – Classificação – Teses. 5. Sensoriamento remoto – Teses. I. Ceddia, Marcos Bacis, 1968-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

ANA CAROLINA DE SOUZA FERREIRA

Dissertação/Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/02/2016

Marcos Bacis Ceddia. Dr.UFRRJ
(Orientador)

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ

Gustavo de Mattos Vasques Dr.EMBRAPA - Solos

A Deus, minha família e amigos, por todas as palavras que me deram força para seguir em frente nos momentos difíceis, obrigada pelo apoio, paciência e confiança.

Ofereço

À minha mãe, Maristela, pela minha vida, amor, paciência e dedicação durante minha jornada, me aconselhando e acreditando no meu sucesso, a ela eu devo todo meu amor e carinho.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que está presente em todos os momentos da minha vida, iluminando minha jornada que por vezes se tornou árdua, mas ao meu lado ele me deu força, esperança, saúde e coragem para enfrentar todos os obstáculos.

A minha mãe e meu padrasto Maristela Guimarães de Souza e Maickel Barbosa de Oliveira por todo o carinho paciência e amor, que me deram educação e que nunca mediram esforços para que eu continuasse os sonhos, sempre dispostos a me ajudar independentes de qualquer situação.

A todos os meus familiares que de alguma forma contribuíram para que este sonho se tornasse realidade.

Ao meu namorado Daniel Costa, uma pessoa muito especial que esteve presente ao meu lado nas horas difíceis, sendo compreensível, me confortando, ajudando e sendo meu companheiro nos problemas surgidos no decorrer de todo o meu trabalho.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, que me ofereceu a oportunidade de realizar esse curso, e ao CPGA-CS e a todos os professores que puderam contribuir para meu aprendizado.

Ao Professor Marcos Bacis Ceddia pela orientação, incentivo, paciência, confiança e amizade, sempre solícito durante todo o trabalho.

Ao Professor Mauro Antonio Homem Antunes pela contribuição de seu conhecimento, paciência, confiança e ajuda em todas as dificuldades surgidas no decorrer do desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos que fizeram parte da minha jornada, pelos momentos divertidos, tristes, engraçados, estressantes que pudemos passar juntos e que de alguma forma fazem parte em nossas vidas.

Às amigas, Sandra Lima, Andréa Silva Gomes, pela confiança, amor carinho e apoio. Vocês são pessoas muito especiais que ficaram marcadas na minha vida.

Aos amigos Fábio Rizo, Mateus Gomes, Jerusa, pela ajuda, amizade e carinho.

Aos funcionários da secretaria do CPGA-CS, Marquinhos, Michele e Wagner pela atenção e gentileza.

A CAPES pela concessão de bolsa no primeiro ano de curso e à FAPERJ pela concessão de bolsa no segundo ano, disponibilizando recursos para realização do trabalho de pesquisa.

BIOGRAFIA

Ana Carolina de Souza Ferreira, filha de Ricardo Luiz Lopes Ferreira e Maristela Guimarães de Souza, nasceu em 29 de julho de 1987 na cidade de Volta Redonda, Estado do Rio de Janeiro. Ingressou na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em 2006 no curso de Agronomia, formando-se em janeiro de 2013. Em 2013 foi bolsista de aperfeiçoamento em trabalhos na área de solos, atuando nos temas geoprocessamento, sensoriamento remoto e pedologia. Em março de 2014 iniciou o mestrado no Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

RESUMO GERAL

FERREIRA, Ana Carolina de Souza. **Evolução Espaço Temporal do Uso de Cobertura de Terra e a Suscetibilidade do Município de Angra dos Reis aos Escorregamentos de Terra** 2016. 84f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

Os movimentos de massa (M.M) no município de Angra dos Reis têm sido tratados como um grave problema para o poder público e autoridades, pois o número de vítimas fatais e os danos e prejuízos socioeconômicos e ambientais são crescentes. No entanto, apesar do avanço no uso de ferramentas de geoprocessamento, ainda não se desenvolveu um sistema de alerta e monitoramento de M.M. Do ponto de vista técnico, isso se deve ao pouco conhecimento quantitativo das variáveis que influenciam os movimentos de massa no município, bem como a pouca disponibilidade de mapas detalhados de atributos do solo que têm efeito direto nos M.M (exemplo: profundidade, retenção de água e fluxo de água dos solos). Neste trabalho apresenta-se a hipótese de que falta ainda um estudo mais aprofundado e quantitativo da relação entre os eventos de M.M. e seus fatores determinantes. Assim, os objetivos desse estudo foram: a) avaliar as mudanças do uso do solo no município entre os anos de 1984 e 2014, por meio da classificação de imagens orbitais; b) aplicar a análise fatorial de correspondência binária (AFCB) nas condicionantes físicas que tem potencial para explicar a ocorrência de M.M.; c) utilizar os resultados da AFCB para gerar mapas de suscetibilidade a M.M. Para o desenvolvimento do estudo utilizou-se os seguintes bancos de dados e mapas, dados de M.M e imagens disponíveis: mapa topográfico cadastral (1:10.000), mapa de solo (1:25.000), mapa de uso do solo (1:25.000 – 2002), 384 eventos de M.M georreferenciados (CPRM), imagens orbitais dos satélites Landsat -5 e Landsat -8 (INPE e USGS, respectivamente) dos anos de 1984 a 2014. O mapa de suscetibilidade a M.M. foi validado a partir da comparação da classificação efetuada com 25% dos eventos selecionados aleatoriamente. Os mapas de classes de uso demonstram que apesar das dramáticas catástrofes associadas aos M.M., a área urbana praticamente dobrou (de 23 km² em 1984 para 47 km² em 2014), com sensível aumento no período de 2010 a 2014. A AFCB destacou que as variáveis mais importantes associadas aos M.M. foram: uso campo antrópico (U3C), uso urbano (U4Z), curvatura do terreno retilínea (C2), classe de declividade forte ondulada a montanhosa (I2) e índice topográfico de umidade variando de 5 a 10 (TWI2). A AFCB permitiu ainda auxiliar na decisão dos pesos e notas de cada variável para gerar o mapa de suscetibilidade a M.M, reduzindo a subjetividade na geração do mapa. As classes de suscetibilidade Alta e Muito Alta ao M.M. representam 61.78% do território e a acurácia atingiu 91.69% (54.17% dos eventos na classe muito alta e 37.52% na alta). No entanto, acredita-se que as áreas classificadas como alta e muito alta possam ser melhor discriminadas com a introdução de mapas de profundidade do solo e de retenção de água. Esse ganho de conhecimento aperfeiçoaria o desenvolvimento de sistemas de alerta a M. M.

Palavras chave: Geoprocessamento. Sensoriamento remoto. Análise Fatorial de Correspondência Binária. Deslizamento de terra.

GENERAL ABSTRACT

FERREIRA, Ana Carolina de Souza. **Space temporal evolution of the land use and the susceptibility of Angra dos Reis municipality to landslides**. 2016. 84f. Dissertation (Master of Science in Agronomy, Soil Science) Agronomy Institute, Soils Department, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brazil, 2016.

Landslides in the municipality of Angra dos Reis have been considered as a serious problem for the government and authorities, because of increasing number of fatal victims and socioeconomic and environmental losses. However, despite the advances in the use of geoprocessing tools, an accurate alert and monitoring system of landslides has not yet been developed. From a technical point of view, this is due to the little quantitative understanding of the variables influencing the mass movements in the city, as well as the limited availability of detailed soil attribute maps that have direct effect on landslides (e. g. depth, water retention and water flow). This paper presents the hypothesis that there is still a lack of a quantitative study of the relationship between landslides events and its determinants. The objectives of this study were: a) to evaluate the changes of land use in the municipality between the years 1984 to 2014, through satellite images classification; b) to apply factor analysis binary correspondence (FABC) on the physical constraints that has the potential to explain the occurrence of landslide; c) To use the FABC results to generate landslide susceptibility map. To develop the study, we used the following dataset and maps, landslides data and satellite images: cadastral topographic map (1: 10,000), soil map (1: 25,000), land use map from 2002 (1: 25,000), 384 georeferenced events of landslide (CPRM), and orbital images of Landsat -5 and -8 (INPE and USGS, respectively) in the period between 1984 to 2014. The landslide susceptibility map was validated using 25% of the landslides events of the original dataset, which were randomly selected. The land use maps show that despite the dramatic disasters associated with landslide, the urban area has almost doubled (from 23 km² in 1984 to 47 km² in 2014), with significant increase in the period between 2010-2014. The FABC stressed the most important variables associated with the landslides, which were: anthropic use (U3C), urban use (U4Z), hillside with rectilinear curvature (C2), steepness ranging from strong undulating to mountainous class (I2) and topographic wetness index ranging from 5 to 10 (TWI2). The BCFA further allowed defining the weights and the grades of each variable to generate the landslide susceptibility map, reducing the subjectivity in map generation. The High and Very High classes of landslide susceptibility map represent 61.78% of the territory and the accuracy reached 91.69% (54.17% of events in the very high and 37.52% in the high class). However, it is believed that the areas classified as high and very high can be better discriminated by introducing the soil depth and water retention maps. This gain of knowledge could improve the accuracy of the alert systems for landslides.

Key words: Geoprocessing. Remote sensing. Factor analysis of binary correspondence. Landslide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Movimento de massa do tipo rastejo	4
Figura 2. Movimento de massa do tipo escorregamento planar ocorrido no desastre de 2010.	5
Figura 3. Movimento de massa do tipo escorregamento circular.....	5
Figura 4. Movimento de massa do tipo escorregamento em cunha.	6
Figura 5. Movimento de massa do tipo corrida de lama, terra e detritos respectivamente.	6
Figura 6. Movimento de massa do tipo queda de blocos, rolamento de blocos, tombamento de blocos e deslocamento de blocos, respectivamente	7
Figura 7. Forças atuantes no plano inclinado, g_p (componente perpendicular), g_t (componente tangencial), g (força da gravidade)	10
Figura 8. Exemplo de não representatividade das variáveis no plano fatorial	14
Figura 9. Exemplo de representatividade de relação entre as variáveis	14
Figura 10. Exemplo de representatividade de relação entre as variáveis	14
Figura 11. Exemplo de representatividade de relação inversa entre as variáveis	15
Figura 12. Mapa de localização da área de estudo	20
Figura 13. Padrão de crescimento das classes zona urbana e campo antrópico	24
Figura 14. Área urbana nos períodos de 1984 e 2014.	26
Figura 15. Mapa de classes de solo do município de Angra dos Reis – RJ	33
Figura 16. Mapa de uso de solo do município de Angra dos Reis – RJ.....	33
Figura 17. Exemplo de parte da matriz binária final criada para AFCB.....	38
Figura 18. Fluxograma da elaboração do mapa de susceptibilidade a escorregamentos de terra.	39
Figura 19. Eventos de escorregamento de terra.....	41
Figura 20. Scree plot, eixo y autovalores, eixo x número de componentes.	43
Figura 21. Projeções das variáveis no plano fatorial 1,2.....	45
Figura 22. Projeções das variáveis no plano fatorial 1,3.....	45

Figura 23. Projeções das variáveis no plano fatorial 1,4.....	45
Figura 24. Projeções das variáveis no plano fatorial 1,5.....	46
Figura 25. Projeções das variáveis no plano fatorial 1,6.....	46
Figura 26. Projeções das variáveis com os movimentos de massa no plano fatorial 1,2.	47
Figura 27. Projeções das variáveis com os movimentos de massa no plano fatorial 1,3.	47
Figura 28. Projeções das variáveis com os movimentos de massa no plano fatorial 1,4.	48
Figura 29. Projeções das variáveis com os movimentos de massa no plano fatorial 1,5.	48
Figura 30. Projeções das variáveis com os movimentos de massa no plano fatorial 1,6.	48
Figura 31. Mapa de suscetibilidade do município de Angra dos Reis-RJ com os registros de escorregamento de terra, hidrografia e estrada BR101.....	50
Figura 32. Distribuição dos eventos de escorregamento de terra não modelados nas diferentes classes de suscetibilidade.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de movimento de massa.....	3
Tabela 2. Características das imagens Landsat 5 e Landsat 8	20
Tabela 3. Parâmetros utilizados no processamento das imagens (TM e OLI)	23
Tabela 4. Índices de validação dos mapas de cobertura de terra	24
Tabela 5. Dados, escala e fonte da base digital utilizada na modelagem dos escorregamentos de terra.	32
Tabela 6. Codificação das variáveis condicionantes de escorregamento de terra	35
Tabela 7. Recodificação final das modalidades das variáveis para AFCB.....	37
Tabela 8. Frequência relativa das ocorrências de escorregamento de terra dentro das modalidades das variáveis condicionantes.	42
Tabela 9. Taxa de explicação e sua acumulada	44
Tabela 10. Contribuições absolutas nos eixo 1, 2, 3, 4, 5 e 6 para definição de pesos e notas.	49
Tabela 11. Notas distribuídas referentes às modalidades das classes	49
Tabela 12. Classes de suscetibilidade e respectivas áreas e porcentagem de ocorrência.....	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Definição e Classificação dos Movimentos de Massa	3
2.2 Tipos de Movimento de Massa	3
2.2.1 Rastejo	3
2.2.2 Escorregamentos	4
2.2.3 Corrida de Massa	6
2.2.4 Queda de Blocos	6
2.3 Condicionantes que Determinam os Movimentos de Massa	7
2.3.1 Clima	7
2.3.2 Cobertura Vegetal	8
2.3.3 Relevo	9
2.3.4 Solo	11
2.3.5 Ação Antrópica	12
2.4 Mapeamento do Uso do Solo com o Uso de Sensoriamento Remoto	12
2.4.1 Classificação Supervisionada	13
2.4.1 Classificação Não - Supervisionada	13
2.5 Análise Fatorial de Correspondência	13
3. CAPÍTULO I	16
EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DO USO DE COBERTURA DE TERRA DO MUNICÍPIO DE ANGRA DOS REIS - RJ	16
3.1 RESUMO	17
3.2 ABSTRACT	18
3.3 INTRODUÇÃO	19
3.4 MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.4.1 Banco de dados	20
3.4.2 Georreferenciamento das Imagens e Correção Atmosférica	21
3.4.3 Cálculo do Índice de Vegetação	21
3.4.4 Segmentação e Classificação das Imagens	22
3.4.5 Pós - Classificação e Análise de Dados	23
3.4.6 Avaliação e Validação da Classificação de Imagens	23
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
3.5.1 Dinâmica do Uso de Cobertura de Terra no Período de 1984 á 2014	24
3.6 CONCLUSÕES	27
4. CAPÍTULO II	28
SUSCETIBILIDADE DO MUNICÍPIO DE ANGRA DOS REIS AOS ESCORREGAMENTOS DE TERRA	28
4.1 RESUMO	29
4.2 ABSTRACT	30
4.3 INTRODUÇÃO	31
4.4 MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.4.1 Banco de Dados	32
4.4.2 Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) e Extração dos Atributos do Relevo	34
4.4.3 Modelagem de Suscetibilidade aos Escorregamentos de Terra	34
4.4.4 Extração das Variáveis Predictoras e Divisão do Dataset para Treinamento e Validação	34
4.4.5 Codificação das Variáveis e Criação da Matriz de Dados	34

4.4.6 Ensaio Exploratório e Recodificações	36
4.4.7 Mapa de Suscetibilidade a Escorregamentos de Terra.....	38
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.5.1 Eventos de Escorregamento de Terra.....	41
4.5.1 Estatística Descritiva	41
4.5.1 Análise Fatorial de Correspondência Binária (AFCB)	43
4.6 CONCLUSÕES	53
5. CONCLUSÕES GERAIS	54
6. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
8. ANEXOS	61

1. INTRODUÇÃO GERAL

O município de Angra dos Reis está situado no litoral sul-fluminense, aproximadamente 100 km da cidade do Rio de Janeiro, o qual, por características naturais, apresenta várias áreas com elevado risco natural à ocorrência de movimentos de massa.

Embora os movimentos de massa sejam fenômenos de ordem natural, acredita-se que a ação antrópica tem influenciado a ocorrência destes eventos. O crescimento acelerado e desordenado das populações em encostas é uma das atividades que mais contribuem para que ocorram os movimentos de massa, pois tem causado a degradação e conseqüente desequilíbrio do ambiente proporcionando um aumento de riscos a estes desastres. Segundo estudo realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), em 2011, cerca de 60% da população de Angra dos Reis estaria vivendo em áreas de risco.

Os movimentos de massa no município têm sido tratados como um grave problema para o poder público e autoridades, pois os danos e prejuízos socioeconômicos e ambientais causados somam valores cada vez maiores. Na madrugada do dia 09 de dezembro de 2002, a cidade totalizou um índice pluviométrico de 240 mm de chuva em um intervalo de 24 horas, tendo como conseqüência o soterramento de várias residências no município. Esse episódio foi considerado o primeiro grande desastre, causando 42 vítimas fatais.

O maior desastre registrado no município ocorreu na noite do dia 01 de janeiro de 2010, onde em um intervalo de 36 horas a precipitação chegou a cerca de 583 mm. Aproximadamente 87% do município foi atingido, vitimando fatalmente 50 pessoas. O desastre deixou milhares de desabrigados e desalojados e inúmeros pontos da rodovia BR 101 deslizaram, interrompendo totalmente a passagem de veículos e pessoas. Como resultados foram gerados mais de 1780 interdições de imóveis em decorrência desse evento.

Além das atividades antrópicas observadas nas encostas, outros fatores são responsáveis e devem ser estudados com maior detalhe para a compreensão destes eventos. Dentre estes fatores ou condicionantes físicos que estão presentes na dinâmica da área, podemos destacar o clima, o relevo, o solo e seus atributos físicos.

Atualmente o uso de ferramentas tecnológicas para geração, controle, recuperação, armazenamento e processamento de dados ambientais tem sido fundamental na obtenção de informações que seriam dispendiosas no desenvolvimento de diversos estudos ambientais. No entanto, na elaboração de muitos mapas de suscetibilidade ainda existe bastante subjetividade na determinação dos pesos e notas que representam as variáveis preditoras dos movimentos de massa. Existem muitos mapeamentos que não apresentam a acurácia do mapa de suscetibilidade ao movimento de massa. Por isso é importante combinar métodos estatísticos às ferramentas de geoprocessamento, para geração e posterior validação desses mapas.

Assim, os objetivos desse estudo foram: a) avaliar as mudanças da cobertura de terra no município entre os anos de 1984 e 2014, por meio da classificação de imagens orbitais; b) aplicar a análise fatorial de correspondência binária (AFCB) nas condicionantes físicas que tem potencial para explicar a ocorrência de M.M.; c) utilizar os resultados da AFCB no auxílio da geração de mapas de suscetibilidade a M.M.

No Capítulo I foi avaliada a mudança da expansão urbana do município de Angra dos Reis – RJ nos anos de 1984 e 2014, por meio de classificação supervisionada através das transformações espectrais (NDVI), utilizando dados das imagens TM/Landsat 5 e OLI/Landsat 8 em ambiente SPRING e ArcGIS 9.3. No Capítulo II foi aplicada a análise fatorial de correspondência binária (AFCB) nas condicionantes físicas que tem potencial para explicar mais significativamente a ocorrência de escorregamentos de terra e utilizado os resultados da AFCB para auxiliar a criação do mapa de suscetibilidade a escorregamento de

terra, que é o tipo de movimento de massa que mais ocorre no município de Angra dos Reis-RJ.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Definição e Classificação dos Movimentos de Massa

Nos últimos anos os processos de degradação do solo compõem um enorme problema em escala mundial interferindo não só no equilíbrio ambiental, mas causando prejuízo social e econômico em nosso cotidiano (Oldeman, 1990).

O movimento de massa é um exemplo de catástrofe associada às condicionantes naturais e à degradação dos solos. Existem diversas definições e classificações de autores para os movimentos de massa, assim sendo, (Coronado, 2006; Varnes, 1985) definem-no como um processo pelo qual o material move vertente abaixo sob a ação da força da gravidade.

Segundo alguns autores (Selby, 1982; IPT 1989; Augusto Filho, 1994), classificações mais detalhadas consideram a cinética desse movimento relacionada com a massa de material desprendido e estável, a direção e velocidade de deslocamento, o tipo de estrutura, textura e conteúdo de água do material, o tamanho e forma do material mobilizado.

Tabela 1. Tipos de movimento de massa

Tipo de movimento de massa	Características do movimento de massa
Rastejo (creep)	Movimento lento que ocorre em declives acima de 35°, deslocando porção superior do solo, atingindo baixa profundidade. Possui gradiente vertical de velocidade (maior próximo à superfície, diminuindo com a profundidade).
Escorregamentos (slide)	Envolvem participação da água. Ocorre em relevos de elevada amplitude, com presença de manto de regolito. Causado por elevada pluviosidade e antropismo. Envolve fragmentos de rochas (<i>rockslide</i>) e solos (<i>landslides</i>).
Corridas de massa (flow)	Participação intensa de água, forte caráter hidrodinâmico. O transporte é feito por suspensão ou saltação. A separação entre água e carga sólida é dificultada.
Queda de blocos (fall)	Movimentos desenvolvidos em declives com ângulos próximos a 90°. Queda livre de material (rochas, solos). Ação maior da gravidade, sem água como agente mobilizador.

Fonte: IPT (1989).

2.2 Tipos de Movimento de Massa

2.2.1 Rastejo

O rastejo também chamado de *creep*, pode ser definido como o lento e contínuo movimento das camadas do solo, não apresentando geometria e superfície de ruptura definidas; com o aumento da velocidade pode transformar-se em um escorregamento.

Ocorrem geralmente em camadas superficiais de solo e de transição entre o solo e a rocha, rochas alteradas e em encostas retilíneas e convexas. Nestes casos, o grau de intensidade será conforme a inclinação dessas encostas (Infantir Junior & Fornasari Filho, 1998). Atingindo grandes áreas, este movimento pode ocasionar danos econômicos significativos quando em encostas próximas a obras civis, influenciando em fundações, redes elétricas, pontes etc. Este movimento só é perceptível em observações de longa duração (cm ou mm/ano) e também pode servir como um indicador de ocorrência iminente de escorregamentos. Não há estabelecimento de uma superfície de ruptura, mas acomodações e escoamentos plásticos localizados, potencializados especialmente pela ação das águas da chuva. Geralmente nota-se esse movimento em espaços onde há inclinação de árvores postes ou cercas (Infantir Junior & Fornasari Filho, 1998).

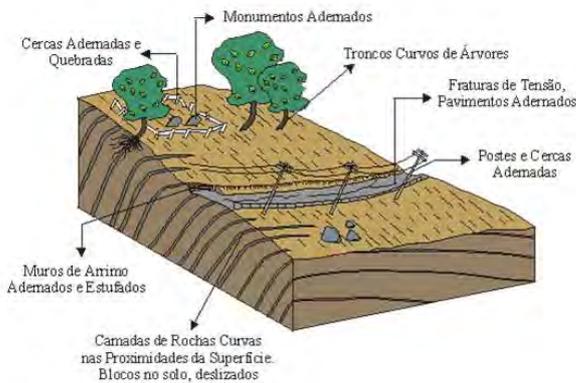


Figura 1. Movimento de massa do tipo rastejo. (Fonte: modificado Bloom 1988, Infantir Junior et al., apud Reis, 2001, Proin/Capes & Unesp/IGCE, 1999).

2.2.2 Escorregamentos

Os escorregamentos (slides), também chamados de deslocamentos ou deslizamentos, caracterizam-se como movimentos rápidos de volume e plano de ruptura bem definidos, de curta duração, envolvendo material que pode ser solo e/ou rocha. Este movimento pode ocorrer em segundos afetando as encostas em limites bem definidos, tanto em profundidade como lateralmente. De acordo com a forma do plano de ruptura podem ser classificados em planares ou translacionais, rotacionais ou em cunha (Augusto Filho, 1994; Guidicini e Nieble 1993).

Os escorregamentos planares ou translacionais, são os que mais estão presentes entre os tipos de movimento de massa na Serra do Mar, estando associado à saturação do solo em consequência à infiltração de água. Nas encostas da região serrana brasileira é normal este tipo de escorregamento com ruptura, podendo haver na junção com a rocha subjacente, em maciços rochosos (Fernandes e Amaral, 2003).

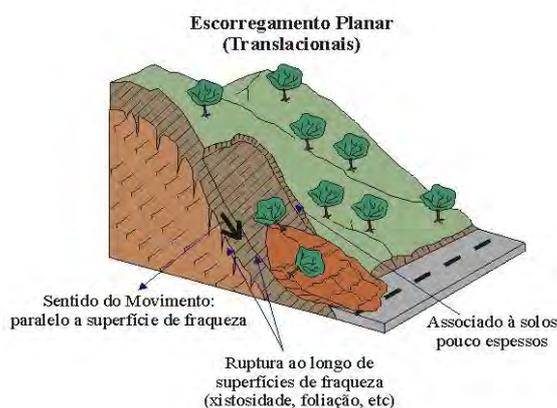


Figura 2. Movimento de massa do tipo escorregamento planar ocorrido no desastre de 2010 pousada Sankay Ilha Grande. (Fonte: modificado Infantir Junior et al., 1998, Reis, 2001, Fotografia: Felipe Dana).

Os escorregamentos circulares ou rotacionais tem seu plano de deslizamento encurvado, côncavo, o que representa o movimento rotacional sobre um eixo. De acordo com Infantir Junior & Fornasari Filho (1998), este tipo de escorregamento só ocorre na Serra do Mar quando está relacionado a uma ação antrópica, não sendo conhecida na literatura sua ocorrência natural.



Figura 3. Movimento de massa do tipo escorregamento circular. (Fonte: Infantir Junior et al., 1998, Reis, 2001, Fotografia: geohazards.cr.usgs.gov).

O escorregamento em cunha desloca o material na forma de um prisma, são mais vistos em taludes de corte, ou em encosta onde houve alguma forma de intervenção natural ou antrópica (Infantir Junior & Fornasari Filho, 1998).

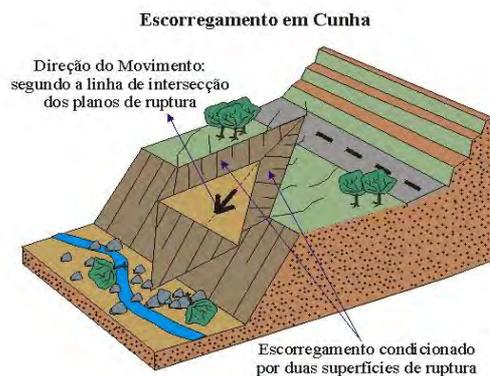


Figura 4. Movimento de massa do tipo escorregamento em cunha. (Fonte: Infantir Junior et al., 1998, Reis, 2001, Fotografia: Montgomery, 1992).

2.2.3 Corrida de Massa

As corridas de massa (flows) são movimentos que atuam na forma de escoamento rápido e que envolvem grandes volumes de material. Podem combinar materiais como solo pouco coesos, rocha, matéria orgânica, ar e água, mobilizados como um fluido encosta abaixo. São classificadas de acordo com a característica do material mobilizado e a velocidade durante o processo, sendo: corrida de lama (mud flow), corrida de terra (earth flow) e corrida de detritos (debris flow).

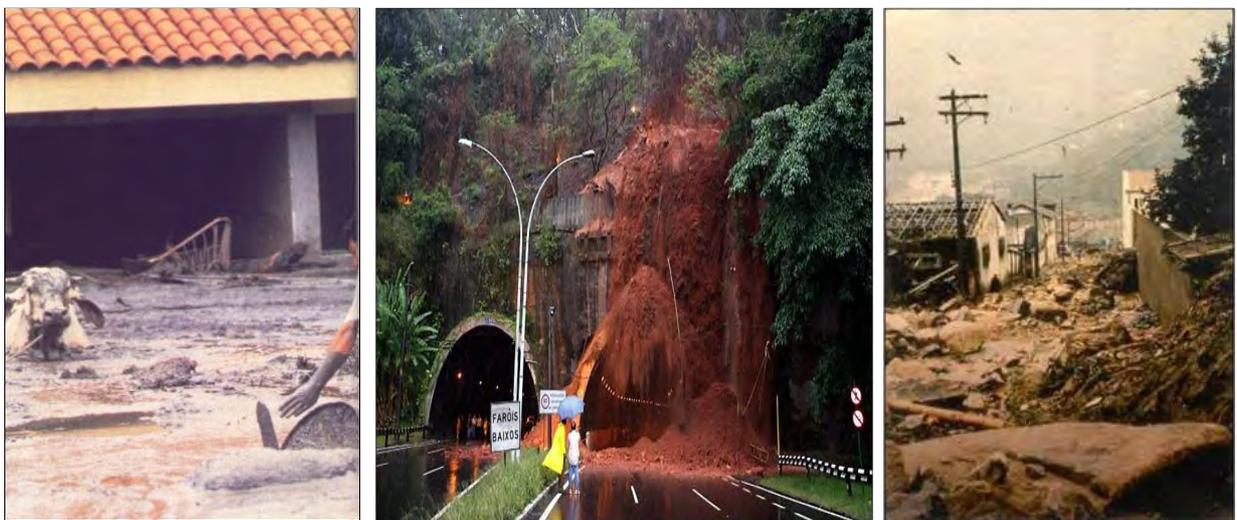


Figura 5. Movimento de massa do tipo corrida de lama, terra e detritos respectivamente. (Fotografias: Murk et al., 1996, Fotografia: diariodorio.com/logstica-para-chuva, Proin/Capes & Unesp/IGCE, 1999)

2.2.4 Queda de Blocos

As quedas de blocos rochosos *falls* ou lascas são movimentos rápidos de blocos e/ou lascas de rocha, que caem pela ação da gravidade, sem a presença de um plano de superfície de deslizamento, na forma de queda livre. São predominantes em encostas íngremes de paredões rochosos podendo ser divididos em quatro tipos; queda de blocos: caracterizam-se por blocos que se desprendem do maciço e se deslocam em queda livre encosta abaixo;

tombamento de blocos: que são blocos rochosos em movimento de rotação; rolamento de blocos: sendo movimento de blocos rochosos ao longo da encosta; e deslocamento: o movimento em queda livre ou por deslizamento de blocos rochosos ao longo do plano estrutural, geralmente devido às variações térmicas ou por alívio de pressão (Infantir Junior & Fornasari Filho, 1998).

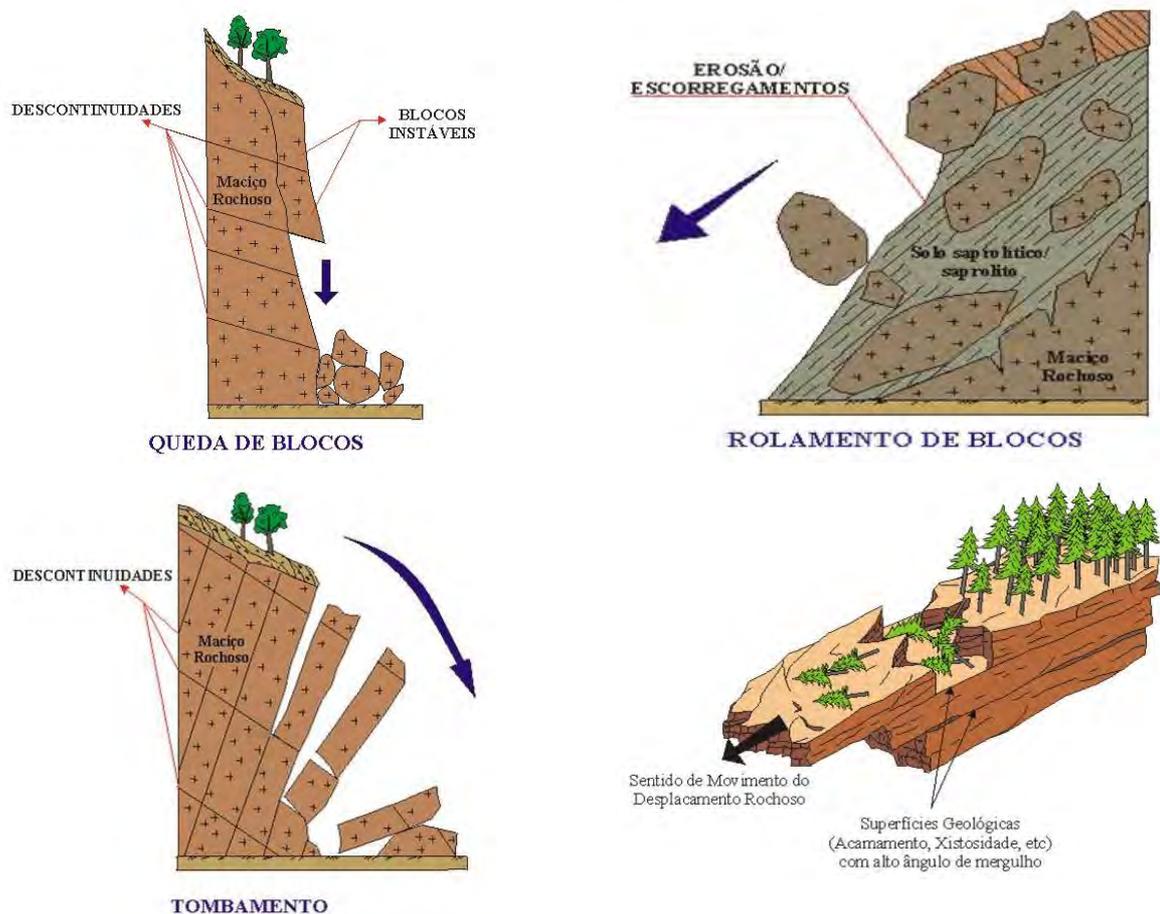


Figura 6. Movimento de massa do tipo queda de blocos, rolamento de blocos, tombamento de blocos e deslocamento de blocos, respectivamente (Fonte: Infantir Junior & Fornasari Filho, 1998, Reis, 2001).

2.3 Condicionantes que Determinam os Movimentos de Massa

As causas básicas da instabilização de encostas são bem conhecidas com base em uma série de estudos específicos. Algumas são peculiares a solos ou rochas pela sua composição ou estrutura, outras como inclinações de taludes naturais são relativamente constantes e outras são variáveis como a água subterrânea e a água da chuva. Existem vários fatores que são responsáveis e que devemos estudar para entendermos melhor como estes eventos se desencadeiam. Dentre estes fatores ou condicionantes físicos que estão presentes na dinâmica superficial da área caracterizam-se: o clima, a cobertura vegetal, o relevo, os tipos de solos e seus atributos físicos e a ação antrópica (Barros, 2001; Selby, 1982; Dikau, 1990).

2.3.1 Clima

O clima pode interferir na paisagem através da temperatura, ventos e chuvas, e suas variações sazonais. A determinação de um processo erosivo necessita antes de tudo um

agente, sendo água ou vento, e um material, no caso o solo. Este agente agirá desprendendo e desagregando suas partículas e transportando-as. A chuva é um dos fatores climáticos mais importantes, pois a maioria dos eventos desastrosos no Brasil, com perdas significativas do solo, relaciona-se à elevada pluviosidade (Lima 1987).

O clima tropical úmido do município de Angra dos Reis favorece a elevadas precipitações que se concentram no verão e desencadeiam os processos de movimento de massa. A água da chuva exerce influência através das gotas de água, que entram em contato com solo com diferentes velocidades e energia, e do escoamento superficial e subsuperficial, exercendo sua ação erosiva. Apenas um evento de chuva pode causar a remoção de toneladas de partículas de solo por hectare. É importante analisar a frequência, acúmulo e intensidade de precipitação que ocorre na área; tempestades ou chuvas contínuas são consideradas uma das formas mais agressivas de contato com o solo (Lago, 1985).

A atuação da chuva nos processos de movimento de massa dependerá de vários fatores, como o tipo de solo, sua profundidade e seus atributos físicos, a presença de cobertura vegetal, o relevo e a interferência do homem na área modificando a paisagem. É importante ressaltar que, quanto mais inclinada a vertente, maior será a velocidade do escoamento superficial, contribuindo, portanto para o processo erosivo. Cada tipo de solo pode reter ou conter uma lâmina de água, bem como apresentar uma taxa de infiltração que depende de suas características físicas, tornando menor ou maior o aparecimento de escoamento superficial e subsuperficial.

Atualmente muitos autores desenvolvem modelos matemáticos que correlacionam as chuvas com futuros movimentos de massa, modelos que se baseiam em algoritmos de decisão com base na comparação entre os registros de chuva e limiares estatisticamente definidos, com base na quantidade total de chuvas, acumulação e intervalos. Desenvolvem-se séries temporais de acumulação de precipitação, que são obtidas a partir do registro de chuvas diárias com o uso de aparelhos como pluviômetro, criando uma série de precipitações diárias e, portanto aplicando uma correlação com os movimentos de massa (Martelloni et al., 2012).

Há diversas formas de integrar dados de precipitação, temperatura e radiação para fornecer índices de clima local. Alguns autores relacionam tendências na precipitação e temperatura com a elevação da área (modelo digital de elevação), usando registros climáticos em longo prazo correlacionando com a elevação para gerar superfícies de previsão de variáveis climáticas mensais, incluindo chuva e temperatura média (McKenzie et al., 1999).

2.3.2 Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal atua interceptando as gotas da chuva pela superfície foliar, diminuindo a energia cinética das gotas e o impacto sobre o solo, o que diminui o escoamento superficial e aumenta a capacidade de infiltração do solo, conseqüentemente o processo erosivo é reduzido. Além disso, ainda colabora com a manutenção da matéria orgânica e nutrientes diminuindo a degradação do solo. Outro fato importante é que alguns tipos de raízes de plantas reduzem a erodibilidade por permitirem uma melhor agregação do solo, além de estruturar o corpo do solo como um todo (Araújo, 2005; Bigarella, 2003).

Muitos estudos demonstram os benefícios que a cobertura vegetal pode fornecer ao solo e ao micro clima da região. No Alasca Wu Mc Kinnell e Swanston (1979) relataram que após o corte de inúmeras árvores que recobriam um vale em Thorne Bay, a frequência com que os deslizamentos surgiam era bem maior, pois nesse caso o solo esta mais sujeito ao impacto causado pela precipitação, gerando escoamento superficial e conseqüentemente arrastando suas partículas. Bermúdez et al (1998) realizou testes em campo em que foram analisadas as variáveis de uso do solo, declividade e cobertura vegetal em diversas condições e constatou que, no período de quatro anos, o menor índice de erosão e escoamento superficial

foi nas áreas com presença de cobertura vegetal. Já as áreas em que foram retiradas as árvores tiveram uma elevada taxa de erosão e escoamento superficial.

Apesar de a cobertura vegetal mostrar aspectos positivos, Rickson (1995) alerta que em encostas com alta declividade, em certos momentos, pode ser observado o efeito alavanca e o efeito cunha. O efeito alavanca é uma consequência de alguns tipos de raízes causarem desagregação mecânica no solo, causado pelos troncos das árvores quando suas copas são afetadas por ventos fortes. O efeito cunha é a pressão lateral causada pelas raízes ao penetrar em fendas, fissuras e canais do solo ou rocha.

Atualmente com o surgimento de técnicas de sensoriamento remoto e mapeamento digital do uso do solo através das imagens de satélite, vem sendo possível calcular índices referentes à vegetação como, por exemplo, índice de vegetação por diferença normalizada, índice de vegetação ajustado ao efeito do solo e índice de área foliar que permitem estimar a presença de vegetação e do solo exposto, sendo possível analisar qual foi o comportamento padrão da vegetação a partir da geração de séries temporais e criação de mapas de uso do solo.

Orozco (2013) analisou imagens de séries temporais NDVI do sensor MODIS no período entre o ano 2000 e 2012, na microrregião de Vilhena RO e, como resultado final, obteve resultados satisfatórios das imagens classificadas de acordo com os diferentes tipos de uso da terra. Victoria et al., (2009) utilizaram séries temporais de imagens EVI do sensor MODIS para discriminar diferentes tipos de vegetação dentro do bioma Pantanal, concluindo que a técnica utilizada se mostrou adequada para a delimitação de áreas com culturas anuais, as quais foram facilmente identificadas.

2.3.3 Relevô

A topografia se destaca pelo comprimento da encosta e pela declividade. O fator declividade tem grande influência, pois quanto maior a declividade, maior a instabilidade das encostas aumentando a probabilidade de se ocorrer movimentos de massa.

Os relevos mais íngremes favorecem a erosão dos solos na medida em que aumentam o escoamento superficial (Guidicini & Iwasa, 1976). Áreas declivosas também possuem, de modo geral, solos mais rasos, os quais são mais facilmente saturados e suscetíveis a escoamento subsuperficial. Neste caso a declividade teria um efeito indireto na ocorrência de movimentos de massa.

A força da gravidade é a principal força que atua nas encostas e que será dependente do grau de inclinação do plano de deslizamento. Em um plano de inclinação, esta força será dividida em duas componentes principais: a força tangencial e a força perpendicular ao plano de inclinação, sendo que a força tangencial será responsável pela movimentação da vertente. No momento em que a força tangencial aumenta a força perpendicular diminui, e quando a tensão tangencial se torna maior do que as forças que atuam na resistência do material a vertente ocorrem os movimentos de massa Figura 7 (Nelson, 2009).

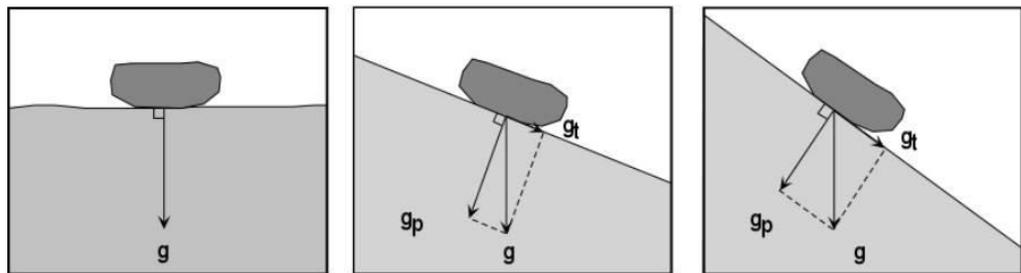


Figura 7. Forças atuantes no plano inclinado, g_p (componente perpendicular), g_t (componente tangencial), g (força da gravidade). Adaptado de Nelson (2009).

A análise do efeito da declividade nesses processos de deflagração de movimento de massa e aumento dessa tensão tangencial está relacionada com outros parâmetros que possuem relação com essa condicionante, como o tipo e a espessura do solo presente, foliação metamórfica e fraturas de alívio de tensão que influenciarão na estabilidade das encostas. A maneira com que a água da chuva escoar na superfície do terreno está associada à intensidade de erosão hídrica. Este escoamento nas vertentes pode ser concentrado ou não concentrado. O escoamento não concentrado tem a característica inicial do escoamento superficial, que pode ocorrer de forma difusa, caso haja irregularidades na superfície topográfica, pois certos obstáculos, tais como tufo de vegetação, calhaus e blocos, dificultam o escoamento. Assim, há possível formação de pequenos fios de água, os quais são responsáveis por um processo de erosão que embora não pareça, pode implicar grandes prejuízos na área e contribuir para o transporte de sedimentos que tendem a assorear os leitos dos cursos de água (Fernandes e Amaral, 2003).

O escoamento concentrado nas vertentes inicia-se por sulcos (rills) no terreno, os quais são manifestações de erosão efêmeras e descontínuas, que se desenvolvem rapidamente durante um episódio chuvoso. Como o escoamento aumenta de acordo com o comprimento e com o declive da vertente, quando a concentração de água se torna elevada nos sulcos atingindo grandes volumes de fluxo, verifica-se um aumento de carga de transporte que origina a libertação de sedimentos, formando as ravinas (gullies). As ravinas funcionam como canais de drenagem que acabaram de se formar e canalizam escoamentos efêmeros, podendo rapidamente atingir alguns metros de profundidade (Brice, 1966).

A dinâmica dos movimentos de massa não está relacionada somente com a declividade do relevo; as demais feições do relevo também influenciam nos eventos, por isso seu estudo é de extrema importância. As encostas possuem exposições à radiação solar e fluxos de água diferentes, que contribuem mais ou menos para áreas mais suscetíveis. O uso de técnicas de geoprocessamento na análise digital de terreno tem facilitado muito o estudo desses eventos, pois essas ferramentas conseguem extrair não só a declividade a partir de modelos digitais de elevação, como diversas feições geomorfológicas como direção da vertente, curvatura, índice topográfico de umidade, permitindo criar modelos de predição de suscetibilidade aos movimentos de massa mais precisos e consistentes. Silveira et al., (2012), por exemplo, realizaram estudo no qual foram gerados os atributos topográficos do relevo, sendo: declividade, plano e perfil de curvatura e orientação das vertentes. Nesse trabalho constatou o potencial de aplicação dos dados SRTM90 (Shuttle Radar Topographic Mission) e seus subprodutos, aliado à aplicação conjunta de técnicas de geoprocessamento e mapeamento geomorfológico em escala regional, para análise digital do relevo empregada no mapeamento de unidades geomorfológicas.

Listo, et al (2010), também analisaram, a partir de um Modelo Digital de Terreno, o papel dos parâmetros topográficos na deflagração de escorregamentos rasos como subsídio

para avaliação de áreas de risco a movimento de massa na bacia do Limoeiro, Alto Aricanduva, SP. Foram gerados os mapas de declividade, direção e curvatura da encosta e área de contribuição e calculada a frequência de distribuição destas variáveis. Os autores concluíram que, embora não sejam os únicos fatores responsáveis pela ocorrência de áreas de risco, os parâmetros topográficos são fundamentais para a localização de áreas mais instáveis.

2.3.4 Solo

Os processos erosivos desenvolvem-se em todos os tipos de solos, sendo mais intensos em uns do que em outros. Essa erosão se dá em função de suas características naturais, como suas propriedades físicas e químicas, e também em função de outros fatores que não estão diretamente ligados à sua gênese. Os solos podem apresentar susceptibilidade diferenciada à erosão, mesmo para condições semelhantes de declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo, pois suas propriedades desempenham diferentes influências sobre os movimentos de massa proporcionando maior ou menor resistência à água e, por conseguinte, favorecendo ou não estes eventos (Bertone e Lombardi Neto, 1999).

Lal (1988) define a erodibilidade do solo como o efeito integrado de processos que regulam a recepção da chuva e sua resistência contra desagregação de partículas e o seu transporte subsequente. Tais processos são influenciados pelas propriedades do solo, como distribuição do tamanho das suas partículas, estabilidade estrutural, conteúdo de matéria orgânica, natureza dos minerais de argila e constituintes químicos. Além disso, considera-se que os parâmetros do solo que afetam a sua estrutura, hidratação e as características da circulação da água afetam sua erodibilidade.

A textura é um fator fundamental na erodibilidade, pois afeta os processos de desagregação e transporte e influencia na maior ou menor quantidade de solo arrastado pela erosão, influi na capacidade de infiltração e de adsorção de água e interfere no potencial de enxurradas do solo e na relação de maior ou menor coesão entre as partículas. Solos de textura fina (argilosos), em geral, resistem bem à desagregação, sendo a areia fina e o silte as componentes granulométricas mais suscetíveis à desagregação e ao transporte. Deve-se analisar a relação de textura com a taxa de intensidade de precipitação na área. Solos com textura arenosa são normalmente porosos permitindo rápida infiltração das águas e consequentemente reduzindo o escoamento superficial. Um solo arenoso pode tolerar uma chuva fraca sem nada sofrer devido à sua maior macroporosidade e alta taxa de infiltração, sendo que este mesmo solo não toleraria uma chuva intensa em certos planos inclinados, proporcionando um arraste de suas partículas já que sua coesão é menor. Por outro lado, um solo argiloso, por geralmente possuir maior microporosidade e resistência ao desprendimento de suas partículas, quando sujeito a chuvas intensas e dependendo de sua taxa de infiltração, pode ocorrer maior escoamento de água e consequentemente erosão. Além disso, solos argilosos apresentam maior peso na encosta devido à maior capacidade de armazenamento de água, o que aumenta a pressão para o surgimento de movimentos de massa (Bertoni e Lombardi e Neto, 1999).

A estrutura que é caracterizada pelo arranjo das partículas do solo, da mesma forma que a textura, influi na capacidade de infiltração, adsorção de água e no arraste de partículas do solo. Solos com estrutura bem desenvolvida apresentam alta porcentagem de poros e consequentemente alta permeabilidade, favorecendo a infiltração das águas de chuva. A agregação entre partículas aumenta a resistência do solo ao arraste de partículas pela ação das águas (Salomão & Iwasa, 1995). Quem determina a maior ou menor capacidade de infiltração das águas de chuva é a permeabilidade do solo, que está diretamente relacionada com a porosidade do solo e é inversamente proporcional à densidade do solo. Por efeito da

compactação, observa-se um aumento da densidade do solo diminuindo a porosidade e tornando o solo mais erodível.

Talvez a profundidade do solo seja um dos atributos mais fortemente associado à ocorrência de movimentos de massa. Solos mais rasos, sobretudo os com contato lítico, tendem a atingir a saturação mais rapidamente. Nesses casos, o fluxo de água superficial e subsuperficial desprende o material e na maioria dos casos arrasta em grandes movimentos de massa. Parte da maioria dos desastres está relacionada, a capacidade de adsorção de água, velocidade de infiltração, acúmulo e movimento de água no solo interferem na suscetibilidade a movimentos de massa (Salomão & Iwasa, 1995).

Diante do exposto, podemos afirmar que a informação de solos na forma de classes de solo não é suficiente para explicar a ocorrência de movimentos de massa; os dados de seus atributos (espessura, infiltração, condutividade hidráulica e textura) são mais importantes. No entanto, em função dos custos e o elevado tempo de campo e laboratório para gerar esses atributos, os respectivos mapas são raramente gerados e disponibilizados.

2.3.5 Ação Antrópica

Embora os movimentos de massa sejam fenômenos de ordem natural, certos fatores externos de ação antrópica influenciam a ocorrência destes eventos. Estudos feitos por Tominaga, L., (2009) apontam que certas atividades exercidas pelo homem, como: desmatamento, concentração do escoamento superficial das águas, uso inadequado dos solos agrícolas e urbanos, ocupação inadequada em encostas, entre outras, agridem e desequilibram o ambiente fazendo com que aumente a suscetibilidade aos desastres.

A utilização inadequada do solo urbano tem causado nas últimas décadas uma intensificação dos estudos na busca de soluções para um planejamento sustentável do ambiente construído. As modificações do espaço urbano acontecem de forma cada vez mais dinâmica, por isso o seu gerenciamento está se tornando um grande desafio para planejadores e gestores. A ação antrópica tem sido caracterizada pelo crescimento acelerado e desordenado das populações em encostas, sendo uma das atividades que mais contribuem para que ocorram os deslizamentos, devido à modificação natural do relevo. Aterros em encostas e habitações com terreno reduzido diminuem a área vegetada, contribuindo para o início dos processos. Corte feito em terrenos, seja para construção ou acessos, criam taludes artificiais e instáveis. Depósitos de lixo geram sobrecargas que induzem os deslocamentos nas encostas. Redes de drenagem mal feitas, fossas, queimadas, escavações e desmatamentos modificam a dinâmica das encostas, aumentando suscetibilidade ao movimento de massa. Muitas áreas onde se percebe a degradação dos solos e a diminuição da vegetação natural têm principal relação com atividades agrícolas e ocupação acentuada pelo homem (INBAR et al., 1998).

2.4 Mapeamento do Uso do Solo com o Uso de Sensoriamento Remoto

A classificação de imagens de satélite tem sido uma técnica bastante utilizada para avaliar a cobertura do solo, associando cada pixel da imagem a uma classe que diz respeito a um objeto real, como por exemplo; zona urbana, vegetação, corpos d'água etc. Dessa forma, os valores numéricos relacionados a cada pixel, são determinados pela reflectância dos objetos que compõem a imagem, e, portanto dando origem aos mapas temáticos (Crósta, 1992). Muitos autores têm utilizado essa técnica para avaliar séries temporais de uso do solo, permitindo a visualização e identificação das alterações na paisagem.

Há vários tipos de classificação digital de imagens, entretanto, as formas mais comuns e difundidas entre os usuários e adotadas pelos softwares comerciais de processamento de imagens são as classificações supervisionada e não supervisionada.

2.4.1 Classificação Supervisionada

A classificação supervisionada é caracterizada pela decisão do analista, há necessidade de conhecimento prévio dos alvos, no qual seleciona pixels das classes desejadas e o software procura localizar os demais pixels que competem àquelas classes, fazendo a classificação através de regras estatísticas pré-estabelecidas. São feitas amostras de pixels de cada classe desejada da imagem de forma que sejam bem representativas. Quanto mais amostras são feitas do mesmo alvo maior é a acurácia da classificação, caso haja dúvida no pixel da classe escolhida o analista pode ser orientado por algum mapa já existente da área ou realizar coletas de campo. O algoritmo necessita ser treinado para poder distinguir as classes uma das outras. O treinamento supervisionado é controlado de perto pelo analista; não existe restrição no número de classes a serem classificadas, somente que o analista faça uma seleção de classes bem distintas porque, caso contrário, no final da classificação ocorrerá muita confusão entre as classes. Há vários métodos de classificação supervisionada: paralelepípedo, distância mínima, distância de Mahalanobis e máxima verossimilhança são os por método pixel a pixel, e por região o classificador Bhattacharya (Meneses & Sano, 2012).

Os classificadores podem ser divididos em classificadores "pixel a pixel" e classificadores por regiões. Classificadores pixel a pixel, utilizam a informação espectral de cada pixel para achar regiões homogêneas, podem ser separados em métodos estatísticos utilizando regras da teoria de probabilidade e determinísticos. Classificadores por regiões utilizam, além de informação espectral de cada pixel, a informação espacial que envolve a relação com seus vizinhos. Procuram simular o comportamento de um foto- intérprete, reconhecendo áreas homogêneas de imagens, baseados nas propriedades espectrais e espaciais de imagens. Em qualquer tipo de classificação de imagens, estas devem passar por correções a fim de corrigir efeitos atmosféricos, se severos, e presença de ruídos (INPE, 2014).

2.4.1 Classificação Não - Supervisionada

A classificação não supervisionada é caracterizada pela decisão do software, ou seja, as classes separadas e o pixel que pertence a estas classes são gerados através do software, o analista não tem decisão, a classificação é de acordo com alguma regra estatística. Esse tipo de classificação pode ser feito quando não se conhece o número e a natureza dos alvos que podem estar presente na área, ou quando há necessidade de se fazer um uma classificação exploratória para saber possíveis classes.

Há dois principais algoritmos de classificação não supervisionada de uso em sensoriamento remoto: ISODATA e K-médias. Ambos se baseiam no agrupamento de pixels por suas similaridades, utilizando técnicas de distância mínima. Por isso, a classificação não supervisionada é também chamada de clustering.

2.5 Análise Fatorial de Correspondência

A análise fatorial de correspondência é uma técnica da estatística multivariada que avalia a correlação entre conjuntos de dados relativamente às suas dimensões comuns, de tal forma que todas as variáveis possam ser representadas por um número mínimo de variáveis (fatores) com a mínima perda de informação e a máxima significância. O objetivo dessa análise é avaliar a importância das condicionantes físicas relacionadas a um objeto de estudo, para no futuro ser criado um modelo estatístico de previsão no qual possam ser identificadas as variáveis potencialmente influentes, ou seja, as que contribuem de forma independente e significativa.

A interpretação em AFC (Análise Fatorial de Correspondência) faz apelo a critérios topo-morfológicos de proximidade e afastamento entre as entidades projetadas nos planos fatoriais, pelo que as coordenadas variáveis e modalidades e das amostras assumem um papel importante na interpretação dos resultados obtidos. As coordenadas das variáveis foram normalizadas de forma que se percebam quais as que mais se correlacionam e aquelas que não possuem correlação alguma. Assim sendo, as variáveis que se aproximarem mais da origem não serão suscetíveis de interpretação no eixo fatorial, uma vez que estas conduzem a coordenadas de valor baixo como mostrado na (Figura 8).

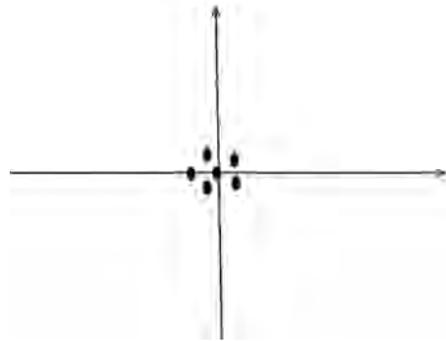


Figura 8. Exemplo de não representatividade das variáveis no plano fatorial

As variáveis que se encontram afastadas da origem terão não só uma forte associação com o eixo fatorial onde se projetam, mas também uma forte associação direta com as outras variáveis que igualmente existem no plano fatorial e que por este fato se projetam perto uma das outras (Figuras 9 e 10, respectivamente).

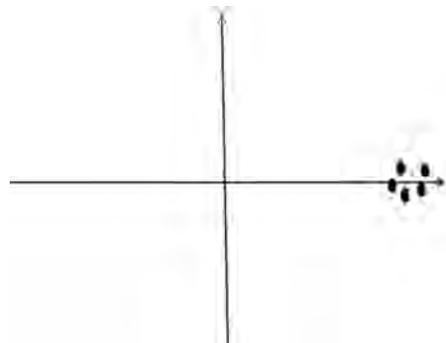


Figura 9. Exemplo de representatividade de relação entre as variáveis

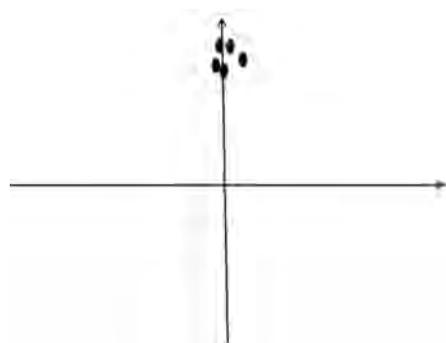


Figura 10. Exemplo de representatividade de relação entre as variáveis

Além destes casos, poderá existir a situação em que um grupo de variáveis está diretamente proporcional a outro grupo de variáveis, se opondo entre si. Neste caso, estes dois grupos irão estar fortemente correlacionados, mas de forma inversa (exemplo da Figura 11).

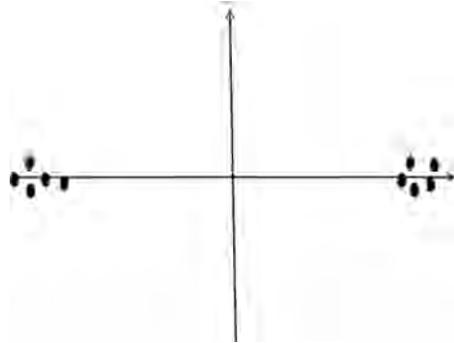


Figura 11. Exemplo de representatividade de relação inversa entre as variáveis

Todas essas considerações em relação à projeção das variáveis nos eixos fatoriais do plano fatorial são igualmente válidas para o outro eixo do plano fatorial, isto é, mantem-se os critérios de representatividade das variáveis e modalidades sempre que o valor da coordenada for elevado. De acordo com Alves, et al., (2011), para considerar a representatividade de uma modalidade no eixo fatorial considera-se que uma modalidade esteja relacionada com o eixo sempre que a sua contribuição absoluta for superior a $100/p$ (p = modalidades) ou quando sua coordenada no eixo fatorial for superior a $\pm 0,5$. Com esta metodologia conseguimos considerar os fatores (eixos) a reter na análise, a qual leva em consideração o poder explicativo que determinado fator tem para uma dada modalidade, embora a variabilidade explicada ou valor por esse fator possa ser reduzida.

3. CAPÍTULO I

EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DO USO DE COBERTURA DE TERRA DO MUNICÍPIO DE ANGRA DOS REIS - RJ

3.1 RESUMO

O uso de sensoriamento remoto tem permitido a praticidade na classificação de imagens de satélites, sendo muito utilizada nos estudos ambientais na avaliação da dinâmica da paisagem através de classificações do uso e cobertura de terra. Portanto, este estudo avaliou as mudanças da expansão urbana do município de Angra dos Reis – RJ nos anos de 1984 e 2014, por meio de classificação supervisionada através das transformações espectrais (NDVI-Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), utilizando dados das imagens TM/Landsat 5 e OLI/Landsat 8 em ambiente SPRING e ArcGIS 9.3. Na classificação supervisionada do uso de cobertura de terra o método utilizado foi o de classificação supervisionada por região Bhattacharya. De modo geral, o método bhattacharya obteve resultado satisfatório na classificação do uso de cobertura de terra tornando possível a identificação da mudança espaço temporal da zona urbana no município. A área urbana do município esta em crescente expansão, dobrando de 23 km² para 47 km² no período de 1984 a 2014. A expansão urbana se intensificou no período de 2010 a 2014, sendo que algumas áreas ainda foram ocupadas em direção a encostas declivosas, como por exemplo, a classe forte ondulada.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Correção atmosférica. Método Bhattacharya.

3.2 ABSTRACT

The use of remote sensing has enabled convenience in satellite image classification, commonly used in environmental studies in the evaluation of landscape dynamics through classifications of land use and land cover. Therefore, this study evaluated the changes of urban expansion of the city of Angra dos Reis - RJ in 1984 and 2014, through supervised classification through spectral transformations (NDVI- Normalized Difference Vegetation Index), using data from TM / Landsat 5 and OLI / Landsat 8 in SPRING and Arcgis 9.3 environment. In supervised classification of soil cover the method used was the supervised classification by Bhattacharya region. In general, the Bhattacharya method achieved satisfactory results in the classification of land cover use making it possible to identify the timeline change the urban area in the municipality. The urban area of the municipality is in increasing expansion, doubling from 23 square kilometers to 47 square kilometers in 1984 and 2014. The urban expansion has intensified in the period 2010 to 2014, and some areas were still occupied toward the steep slopes.

Key words: Remote sensing. Atmospheric correction. Bhattacharya method.

3.3 INTRODUÇÃO

A utilização inadequada do solo urbano tem causado nas últimas décadas uma intensificação dos estudos na busca de soluções para um planejamento sustentável do ambiente construído. As modificações do espaço urbano acontecem de forma cada vez mais dinâmica e rápida, por isso o seu gerenciamento está se tornando um grande desafio para planejadores e gestores. Monitorar as transformações e interações da expansão urbana nas cidades é tarefa fundamental para a atividade de planejamento e para a articulação de políticas regionais e urbanas.

Um exemplo típico de região com frequentes ocorrências de movimentos de massa é o município de Angra dos Reis-RJ, o que tem demandado maior frequência na geração de mapas temáticos do uso e cobertura de terra. Embora os movimentos de massa sejam fenômenos de ordem natural, acredita-se que a ação antrópica tem influenciado a ocorrência destes eventos. O crescimento acelerado e desordenado das populações em encostas é uma das atividades que mais contribuem para que ocorram os movimentos de massa, pois tem causado a degradação e consequente desequilíbrio do ambiente proporcionando um aumento de riscos a estes desastres.

A classificação de imagens de satélite tem sido uma técnica bastante utilizada para avaliar o uso da cobertura de terra, permitindo a visualização e identificação das alterações na paisagem com o passar dos anos. Essa classificação consiste na associação de cada pixel da imagem a uma classe que diz respeito a um objeto real como, por exemplo; área urbana, vegetação, água etc, no entanto, diferentes resultados podem ser obtidos, dependendo do algoritmo de classificação utilizado. Há vários tipos de classificação digital de imagens, sendo mais comum a classificação supervisionada e não supervisionada (Crósta,1992).

Existem várias técnicas de processamento de imagens que otimizam a exploração dos dados de sensores remotos como por exemplo, referentes aos índices de vegetação. O uso do índice de vegetação por diferença normalizada para o estudo de áreas urbanas tem sido muito aplicado em imagens Landsat. (Gallo e Tarpley, 1996; Nichol 1996; Wilson et al. 2003).

Segundo Moreira e Shimabukuro (2004), na literatura são encontrados mais de cinquenta índices de vegetação sendo quase todos obtidos de medidas da reflectância nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Os dois tipos mais comumente utilizados, no entanto, são: Razão Simples (RVI) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Portanto, este estudo avaliou as mudanças da expansão urbana do município de Angra dos Reis – RJ nos anos de 1984 e 2014, por meio de classificação supervisionada através das transformações espectrais (NDVI), utilizando dados das imagens TM/Landsat 5 e OLI/Landsat 8 em ambiente SPRING (Câmara et al., 1996) e ArcGIS 9.3.

3.4 MATERIAIS E MÉTODOS

O município de Angra dos Reis situa-se entre os paralelos 44° e 45° WG e 22°30' e 23°30' SE na região Sul Fluminense do estado do Rio de Janeiro. A área de estudo caracteriza-se pela faixa mais próxima do litoral do Município onde se encontra maior índice de ocupação incluindo os distritos de Mambucaba, Jacuecanga e Angra dos Reis correspondendo a um tamanho de 62429,029 km² (Guanziroli,1983) (Figura 12). O clima da área é caracterizado como Af, clima tropical úmido sem estações de seca definida, conforme classificação de Köppen, 1948. A região possui um índice de precipitação média de 2000 mm a 2500 mm anuais (INEA, 2014).

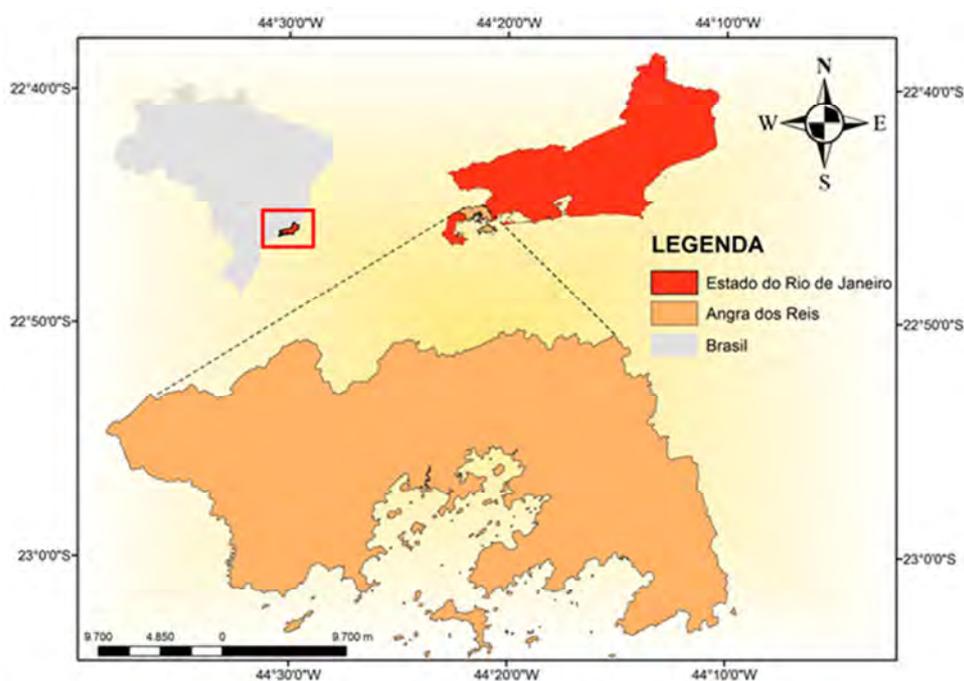


Figura 12. Mapa de localização da área de estudo

3.4.1 Banco de dados

O banco de dados foi composto pelas imagens do sensor TM (Thematic Mapper) do satélite Landsat 5 e sensor OLI (Operational Land Imager) do Landsat -8 foram adquiridas no site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e do USGS (United States Geological Survey) constituindo de um conjunto de dados a partir da data de 1984 á 2014 respectivamente, as características das imagens encontram-se na Tabela 2:

Tabela 2. Características das imagens Landsat 5 e Landsat 8.

Satélite	Landsat-5	Landsat-8
Sensor	TM	OLI
Bandas espectrais	630-690 nm (Banda 3, vermelho)	640-690 nm (Banda 4, vermelho)
	760-900 nm (Banda 4, infravermelho próximo)	850-880 nm (Banda 5 infravermelho próximo)

Resolução espacial	30m x 30m	Pancromático: 15,0 m (Banda 8); Multiespectral: 30,0 m (Bandas 1-7 e 9); Termal: 100,0 m (Bandas 10-11).
Órbita-Ponto	218-076	218-076
Data	1984 1986 1989 1992 1994 1996 1999 2000 2002 2004 2006 2007 2010 2011	2014
Datum Horizontal	WGS84	WGS84

3.4.2 Georreferenciamento das Imagens e Correção Atmosférica

As imagens Landsat -5 foram registradas através de pontos de controle selecionados tendo como base de referência a imagem Landsat -8. Depois do registro foi aplicado o modelo 6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum) para correção atmosférica que foi originalmente desenvolvido para a simulação de radiância, á nível de satélite (Vermote et al. 1997) e adaptado para a correção atmosférica de imagens por Antunes et al. (2012).

3.4.3 Cálculo do Índice de Vegetação

Após o tratamento e correções das imagens, foram calculados os índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para as próximas etapas, de segmentação e classificação supervisionada. O motivo pelo qual se utilizou o índice NDVI para a classificação está relacionado às faixas do vermelho e do infravermelho próximo que representam mais de 90% da variação da resposta espectral da vegetação, sendo assim, este índice realça o comportamento espectral da vegetação, correlacionando-os com os parâmetros biofísicos da mesma. Além disso, as técnicas de realce de imagem por meio de índices de vegetação aumentam o brilho das áreas vegetadas, tornando melhor a interpretação visual e computacional das imagens a serem classificadas (Rosa, 2003).

O cálculo do (NDVI) foi implementado utilizando a função operações aritméticas do SPRING 5.2.1, por meio da equação demonstrada abaixo:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$$

Em que, o NDVI é igual à diferença das bandas infravermelho próximo e vermelho dividida pela soma das mesmas bandas, respectivamente.

O NDVI se traduz por um indicador numérico, que varia, teoricamente, zero (referente à vegetação sem folha, submetida à condição de estresse hídrico por déficit de água no solo) a 1,0 (relativo à vegetação com folhas, sem restrições hídricas e na plenitude de suas funções metabólicas e fisiológicas). Nas imagens NDVI, os níveis de cinza mais claros representam a vegetação com alta densidade e vigor, enquanto os níveis de cinza mais escuros representam baixos índices de vegetação, correspondendo a alvos urbanos como área construída, solo exposto, água e nuvens caso estas estejam presentes na imagem.

3.4.4 Segmentação e Classificação das Imagens

A segmentação foi realizada através do método de crescimento de regiões. Foram realizados vários testes de segmentação nas imagens NDVI geradas a partir das imagens dos anos 1984 a 2014, visando extrair as feições de interesse, quais sejam, água, zona urbana, vegetação, campo antrópico, sombra e nuvem. Utilizou-se o processo de segmentação por crescimento de regiões como uma etapa prévia à classificação supervisionada. Foram testadas diversas combinações dos parâmetros “similaridade” e “área”.

A similaridade busca agrupar os objetos com níveis de cinza semelhantes, bem como também a textura; o limiar de área é o número mínimo de pixels para que uma região seja individualizada. Esta técnica é um processo iterativo pelo qual os pixels vão sendo agrupados, segundo um critério de similaridade, formando regiões (Bins et al., 1996).

Após a segmentação, foram realizadas as classificações das imagens NDVI Landsat-5 e Landsat-8. Foi executada uma classificação supervisionada pelo algoritmo Bhattacharya, a distância Bhattacharya é calculada pela seguinte expressão:

$$B(pi, pj) = \frac{1}{2} (m1 - m2)^T \sum (mi - mj) + \frac{1}{2} \ln \frac{|\sum(mi - mj)|}{|\sum i|^{\frac{1}{2}} |\sum j|^{\frac{1}{2}}}$$

Em que:

B = distância de Bhattacharyya

Pi e pj = pixels nas classes i e j

mi e mj = médias das classes i e j

T = matriz transposta

ln = logaritmo neperiano

i e j = classes dentro do contexto

A distância de Bhattacharya mede a separabilidade estatística entre um par de classes espectrais, ou seja, mede a distância média entre as distribuições de probabilidades de classes espectrais (Correia et al., 2007). Esse classificador é um algoritmo que permite a interação do analista, que seleciona os polígonos gerados na segmentação para definir as amostras de treinamento das classes a serem mapeadas. Na classificação foram definidas as seguintes classes temáticas para o uso da cobertura de terra no município de Angra dos Reis-RJ: água, zona urbana, vegetação, campo antrópico, sombra e nuvem. A vegetação inclui qualquer tipo de vegetação; mata, pasto, vegetação rasteira, arbustivas com exceção das vegetações em estado de estresse. O campo antrópico inclui as áreas onde existe interferência antrópica, que tiveram suas paisagens naturais transformadas, regiões que apresentam pouca ou nenhuma área construída, bem como áreas onde não se tem vegetação definida, áreas desmatadas e com vestígios de produção agrícola. Zona urbana são áreas onde se tem a presença de casas, edifícios, estradas e ruas.

Tabela 3. Parâmetros utilizados no processamento das imagens (TM e OLI)

NDVI	Ganho = 127	Offset = 0
Segmentação	Similaridade = 10	Área pixel = 30
Classificação	Limiar de aceitação = 100%	Classes temáticas = Água, Vegetação, Zona Urbana, Campo Antrópico, Nuvem e Sombra

3.4.5 Pós - Classificação e Análise de Dados

O procedimento de pós-classificação em uma imagem classificada tem o objetivo de uniformizar os temas, eliminando pontos isolados e classificados diferentemente de sua vizinhança. Este procedimento funciona como um processo de extração de pixels isolados em função de um limiar e um peso fornecido pelo usuário. Com isso o objetivo da pós-classificação é gerar uma imagem de aparência menos ruidosa. Feito esse procedimento, é realizada a edição vetorial conferindo se as classes foram classificadas corretamente e por fim gerando o mapa temático. Logo, foi realizada a análise quantitativa das classes campo antrópico e zona urbana, que inclui o tamanho das áreas dos temas classificados em km² para a compreensão das mudanças espaciais ocorridas no município de Angra dos Reis-RJ.

3.4.6 Avaliação e Validação da Classificação de Imagens

A avaliação da classificação é feita a partir de análises estatísticas, verificando se a classe na qual um determinado alvo foi incluído corresponde a sua classe verdadeira. O software SPRING utiliza a técnica de análise estatística conhecida como Matriz de Confusão. A matriz de confusão mostra o quanto o classificador de imagens confunde uma classe com outra. A partir da matriz confusão, pode-se calcular um índice de precisão (ou exatidão) da classificação total, como o Índice de Erro Global, o Índice Kappa e o Índice Tau. Uma matriz de classificação ideal deve apresentar os valores de desempenho médio próximos a 100%, indicando que não houve confusão entre as classes.

Índices de acurácia descritos por Brites et al. (1996):

Exatidão Global:

$$(G = \frac{[\sum_{i=1}^M nii]}{N})$$

Índice Kappa:

$$(K = \frac{[Po - Pc]}{[1 - Pc]})$$

Índice Tau:

$$(T = \frac{[Po - 1/M]}{[1 - 1/M]})$$

Em que:

$\sum_{i=1}^M nii$ = somatório dos pontos corretamente classificados dentro de cada classe;

N = número total de pontos contemplados na matriz;

Po = proporção de unidades que concordam plenamente;

Pc = proporção de unidades que concordam por casualidade;

M = número de categorias na classificação.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Dinâmica do Uso de Cobertura de Terra no Período de 1984 á 2014

Os mapas de uso de cobertura de terra no período de 1984 a 2014 são apresentados no anexo B. Os resultados da validação do algoritmo classificador (Tabela 4) demonstram excelente desempenho (acima de 99% em todos os índices).

Tabela 4. Índices de validação dos mapas de cobertura de terra

Ano da Imagem	Desempenho Geral %	Índice Kappa %	Índice Tau %
1984	99,90	99,90	99,56
1986	99,97	98,97	99,69
1989	100	100	100
1992	99,91	99,35	99,88
1994	100	100	100
1996	100	100	100
1999	99,86	99,22	99,81
2000	99,88	99,48	99,85
2002	99,97	99,80	99,97
2004	99,99	99,91	99,98
2006	100	100	100
2007	100	100	100
2010	99,95	99,75	99,94
2011	100	100	100
2014	100	100	100

Dentre as classes de uso, são destacados o uso urbano e campo antrópico, uma vez que esses são mais diretamente associados às atividades humanas que podem influenciar a suscetibilidade ao movimento de massa. Observando a Figura 13 e os mapas em anexo, nota-se que a classe de uso urbana seguiu um padrão de crescimento contínuo. A área urbana dobrou (de 23 km² para 47 km²), com destaque para a intensificação da expansão urbana no período de 2010 a 2014.

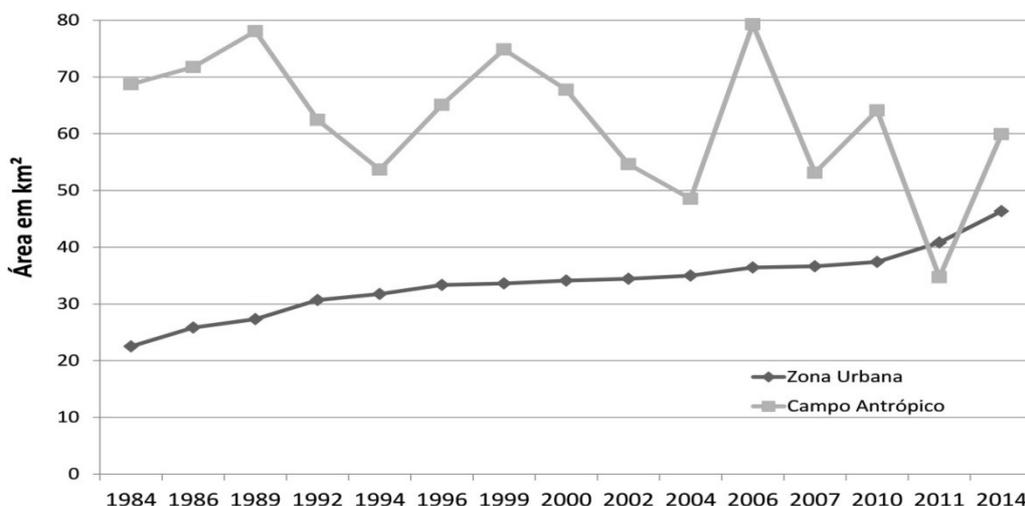


Figura 13. Padrão de crescimento das classes zona urbana e campo antrópico

Por outro lado, a classe de uso campo antrópico (regiões que apresentam pouca ou nenhuma área construída, ou que não se tem vegetação definida) apresenta um padrão cíclico de aumento e decréscimo ao longo dos anos. O campo antrópico apresenta esse padrão, em função de sua dinâmica aleatória ao longo dos anos. Por exemplo, uma área com cobertura vegetal vigorosa, pode no ano seguinte se tornar um terreno degradado pelo homem. Grande parte dos movimentos de massa ocorre nessa classe. A frequência alta no histórico de ocorrências relacionado ao campo antrópico pode ser explicada pelo desequilíbrio que essa classe proporciona na paisagem, pois os movimentos de massa não são fenômenos que ocorrem de forma pontual. De fato, acredita-se que o movimento de massa seja também influenciado pelas mudanças que ocorrem no entorno, adquirindo assim um padrão zonal (uma região de suscetibilidade e não um ponto específico).

Observando a Figura 14, o mapa da mancha urbana de 1984 e 2014 mostra que algumas áreas ainda foram ocupadas em direção a encostas declivosas, como por exemplo, a classe forte ondulada, sendo considerado ainda um problema na prevenção de escorregamentos no município.

Essa série de dados caracteriza o padrão de uso do solo do município. Geralmente os aglomerados urbanos têm crescido aceleradamente de forma pouco ordenada, gerando danos significativos, principalmente nos terrenos de relevo movimentado e de elevadas declividades, os quais potencializam a ocorrência movimentos de massa. O município de Angra do Reis já possui uma suscetibilidade natural elevada, e esse estudo permitiu evidenciar que em algumas áreas o padrão de ocupação do solo continua igual, ou seja, a expansão urbana ainda continua em direção a áreas declivosas e sujeitas à suscetibilidade a estes eventos.

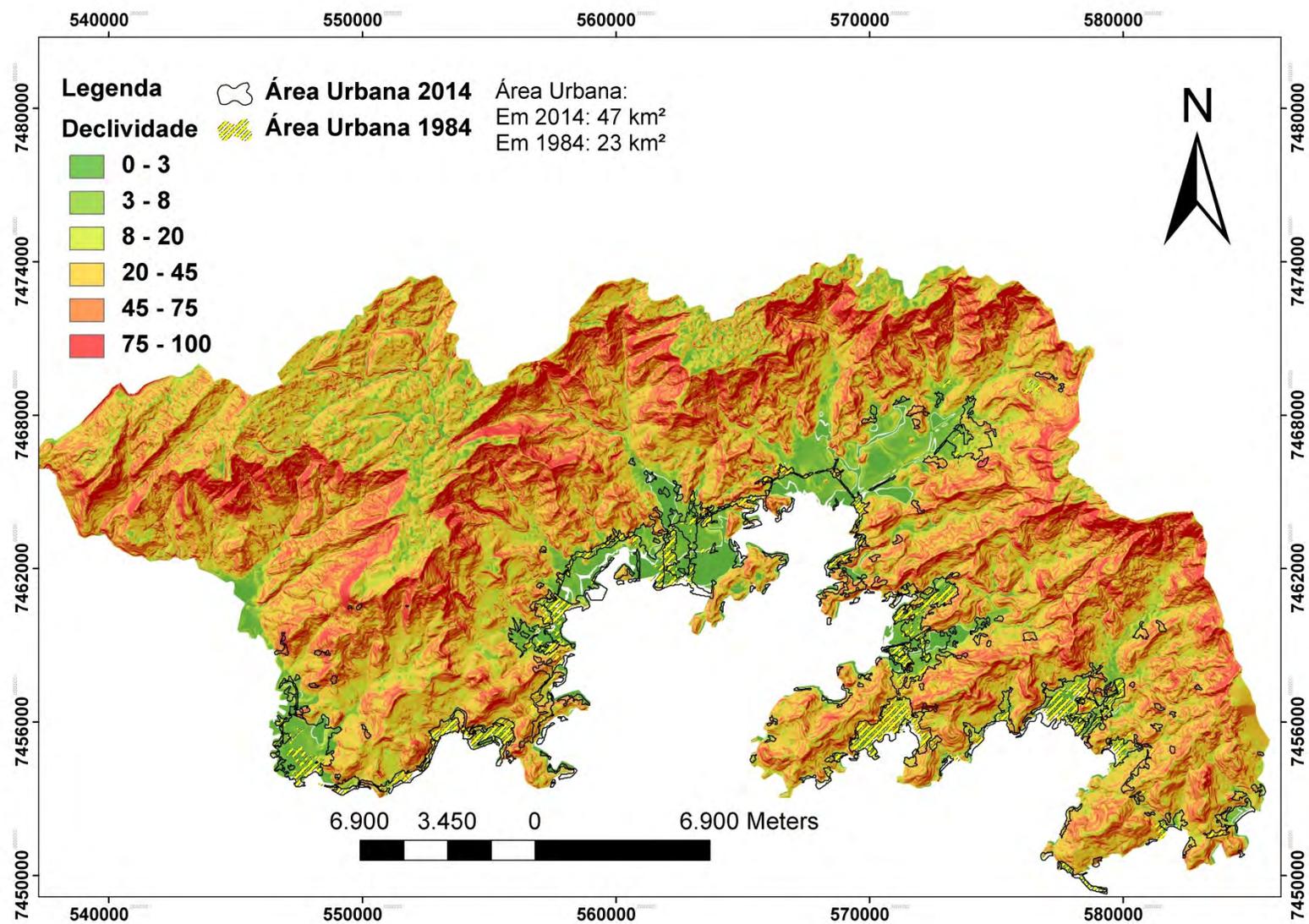


Figura 14. Área urbana nos períodos de 1984 e 2014.

3.6 CONCLUSÕES

A área urbana do município esta em crescente expansão, dobrando de 23 km² para 47 km² no período de 1984 a 2014.

A expansão urbana se intensificou no período de 2010 a 2014, sendo que algumas áreas ainda foram ocupadas em direção a encostas declivosas, como por exemplo, a classe forte ondulada.

4. CAPÍTULO II

SUSCETIBILIDADE DO MUNICÍPIO DE ANGRA DOS REIS AOS ESCORREGAMENTOS DE TERRA

4.1 RESUMO

A ocorrência de deslizamentos de terra nos municípios vem sendo tratada como um grave problema para o poder público, pois os prejuízos humanos, econômicos e sociais são severos. O uso de ferramentas tecnológicas para o mapeamento dessas áreas é muito importante e eficaz no auxílio da determinação de futuras áreas com potencial de deslizamentos, diminuindo futuras perdas econômicas, sociais e ambientais. Foi aplicada a análise fatorial de correspondência binária (AFCB) nas condicionantes físicas que têm potencial para explicar mais significativamente a ocorrência de deslizamento de terra. A AFCB também foi utilizada para auxiliar na determinação das notas e pesos na geração do mapa de suscetibilidade a deslizamentos de terra. A AFCB destacou que as variáveis mais importantes associadas aos deslizamentos de terra foram: uso campo antrópico (U3C), uso urbano (U4Z), curvatura do terreno retilínea (C2), classe de declividade forte ondulada a montanhosa (I2) e índice topográfico de umidade variando de 5 a 10 (TWI2). O uso da AFCB reduziu a subjetividade na geração do mapa de suscetibilidade a deslizamentos de terras. Em relação ao mapa de suscetibilidade ao deslizamento de terra, as classes de suscetibilidade Alta e Muito Alta representam 61,78% do território e a acurácia atingiu 91,69% (54,17% dos eventos na classe muito alta e 37,52% na alta). No entanto, acredita-se que as áreas classificadas como alta e muito alta possam ser mais bem discriminadas com a introdução de informações de profundidade do solo e de retenção de água. Esse ganho de conhecimento aperfeiçoaria o desenvolvimento de sistemas de alerta a deslizamentos de terra.

Palavras-chave: Geoprocessamento. Análise multivariada. Movimento de massa.

4.2 ABSTRACT

The occurrence of landslides in the municipalities has been considered as a serious problem by the government, once it causes severe human, economic and social losses. The use of technological tools for mapping these areas is very important and effective in aid of determining future areas of potential landslide, reducing future environmental and social economic losses. It was applied the factor analysis of binary correspondence (FABC) in physical conditioning that has the potential to explain more significantly the occurrence of landslides. The FABC was also used to determine the grades and weights of each physical conditioning to generate the landslide susceptibility maps. The FABC highlighted that the most important variables associated with landslides were: anthropic use (U3C), urban use (U4Z), hillside with rectilinear curvature (C2), steepness ranging from strong undulating to mountainous class (I2) and topographic wetness index ranging from 5 to 10 (TWI2). The use of FABC reduced subjectivity in the generation of landslides susceptibility map. Concerning the landslide susceptibility maps, the classes high and very high together represented 61.78% of the territory and the accuracy reached 91.69% (being 54.17% of the events located at the class of very high landslide's susceptibility, and 37.52% at the class of high susceptibility). However, it is believed that the classes of susceptibility high and very high could be better discriminated if the soil depth and water retention information were introduced in the analysis. This gain of knowledge could enhance the development of landslide alert systems.

Key words: GIS. Multivariate analysis. Mass movement.

4.3 INTRODUÇÃO

Atualmente o estudo dos escorregamentos de terra nos municípios vem sendo tratado como um grave problema para o poder público, pois os prejuízos sócios econômicos e ambientais são devastadores. O crescimento urbano acelerado principalmente sob condições de maior suscetibilidade como em áreas declivosas, ou no qual ocorrem atividades antrópicas intensas como: desmatamento, ocupação desordenada, queimadas, agricultura dentre outras, aumentam o potencial da área a esses eventos.

Apesar de existirem áreas onde se tem a ocorrência natural desses eventos, a falta de planejamento do uso e ocupação do solo em áreas declivosas é ainda uma das principais causas para o início desses eventos.

O uso de ferramentas tecnológicas para o mapeamento dessas áreas é muito importante e eficaz no auxílio da determinação de futuras áreas com potencial a escorregamentos, diminuindo futuras perdas econômicas sociais e ambientais.

Utilizando o método da álgebra de mapas que consiste na superposição das diversas condicionantes tais como: declividade, uso do solo, curvatura dentre outras, é possível gerar o mapa de suscetibilidade a escorregamentos de terra e auxiliar na determinação das futuras áreas suscetíveis a estes eventos, possibilitando aos gerenciadores e gestores governamentais, subsídios para o planejamento, zoneamento urbano e demais obras de infraestrutura no município.

No entanto, quando se realiza um mapeamento de suscetibilidade ainda existe muita subjetividade na hora de determinar quais variáveis possuem maior potencial e importância para explicar maior suscetibilidade a escorregamentos de terra.

Ultimamente, pesquisadores têm incorporados métodos estatísticos na tentativa de gerar novos modelos que poderiam ser aplicados aos estudos de movimento de massa e diminuir a subjetividade na hora de se escolher as condicionantes com maior potencial aos escorregamentos de terra.

Sendo assim, este estudo avaliou como a análise fatorial de correspondência binária poderia auxiliar na determinação da escolha de notas e pesos na importância em relação aos eventos de escorregamentos de terra.

4.4 MATERIAIS E MÉTODOS

O município de Angra dos Reis situa-se entre os paralelos 44° e 45° WG e 22°30' e 23°30' SE na região Sul Fluminense do estado do Rio de Janeiro. A área de estudo caracteriza-se pela faixa mais próxima do litoral do Município onde se encontra maior índice de ocupação incluindo os distritos de Mambucaba, Jacuecanga e Angra dos Reis correspondendo a um tamanho de 62429,029 km² (Guanziroli,1983) (Figura 12). O clima da área é caracterizado como Af, clima tropical úmido sem estações de seca definida, conforme classificação de Köppen, 1948. A região possui um índice de precipitação média de 2000 mm a 2500 mm anuais (INEA, 2014).

4.4.1 Banco de Dados

Para o desenvolvimento desse estudo fez-se necessário o levantamento e organização de mapas, imagens de satélite, relatórios e de dados de diversas instituições, os quais foram gerados em diferentes épocas e escalas e disponibilizados pela prefeitura municipal de Angra dos Reis junto com a secretaria do meio ambiente e defesa civil do município. Todos os mapas e dados foram organizados em um sistema de informação geográfica, permitindo a manipulação e execução de análises espaciais. A base digital foi composta das seguintes informações: altimetria, limites municipais, hidrografia, mapa de classes de solo realizado por Mattos, 1991, mapa de uso do solo do levantamento realizado pela Maplan em 2002, 384 pontos de eventos de escorregamentos de terra georreferenciados (levantamento realizado pela CPRM e incorporado alguns eventos cadastrados pela Defesa Civil do município de Angra dos Reis).

Tabela 5. Dados, escala e fonte da base digital utilizada na modelagem dos escorregamentos de terra.

Dados	Escala	Fonte
Altimetria	1:10000	PMAR
Hidrografia	1:10000	PMAR
Limites Municipais	1:10000	PMAR
BR101	1:10000	PMAR
Mapa de classes de solo	1:25000	MATTOS, L. C. M.
Mapa de uso do solo	1:25000	PMAR/MAPLAN

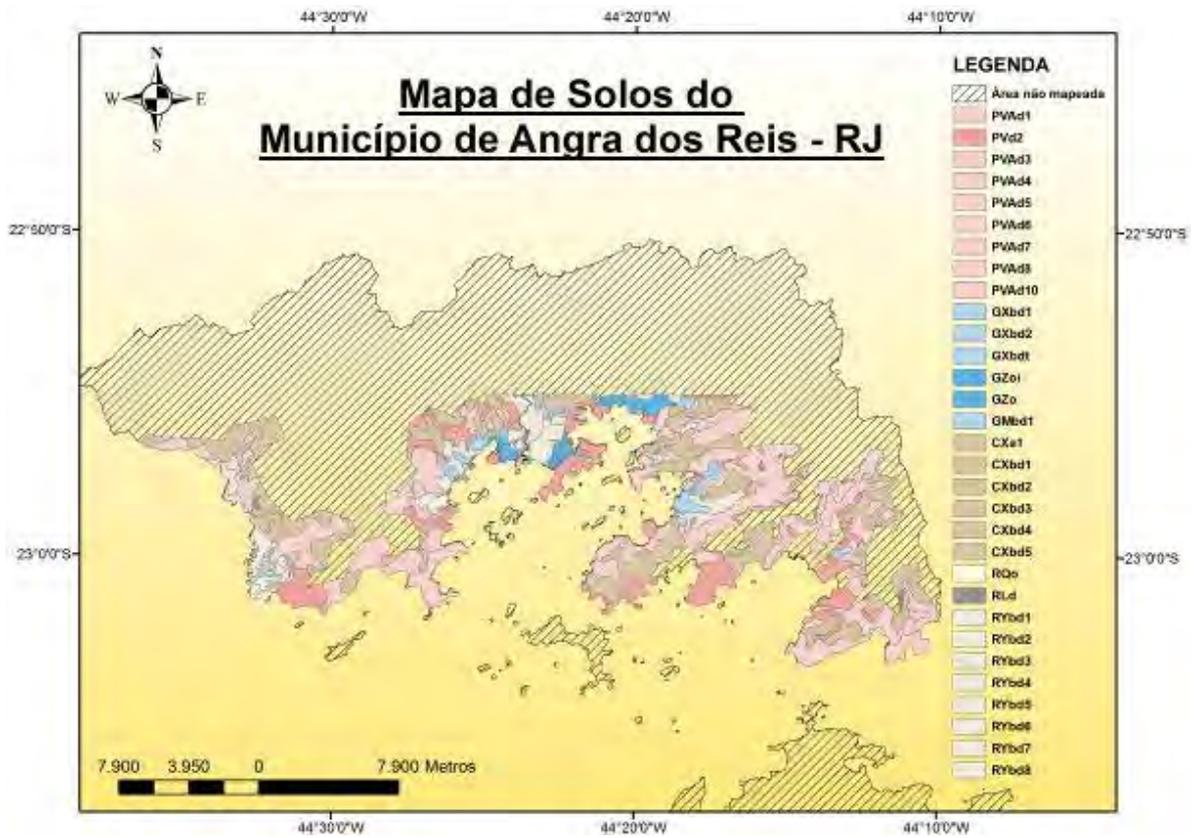


Figura 15. Mapa de classes de solo do município de Angra dos Reis – RJ (Mattos, 1991).

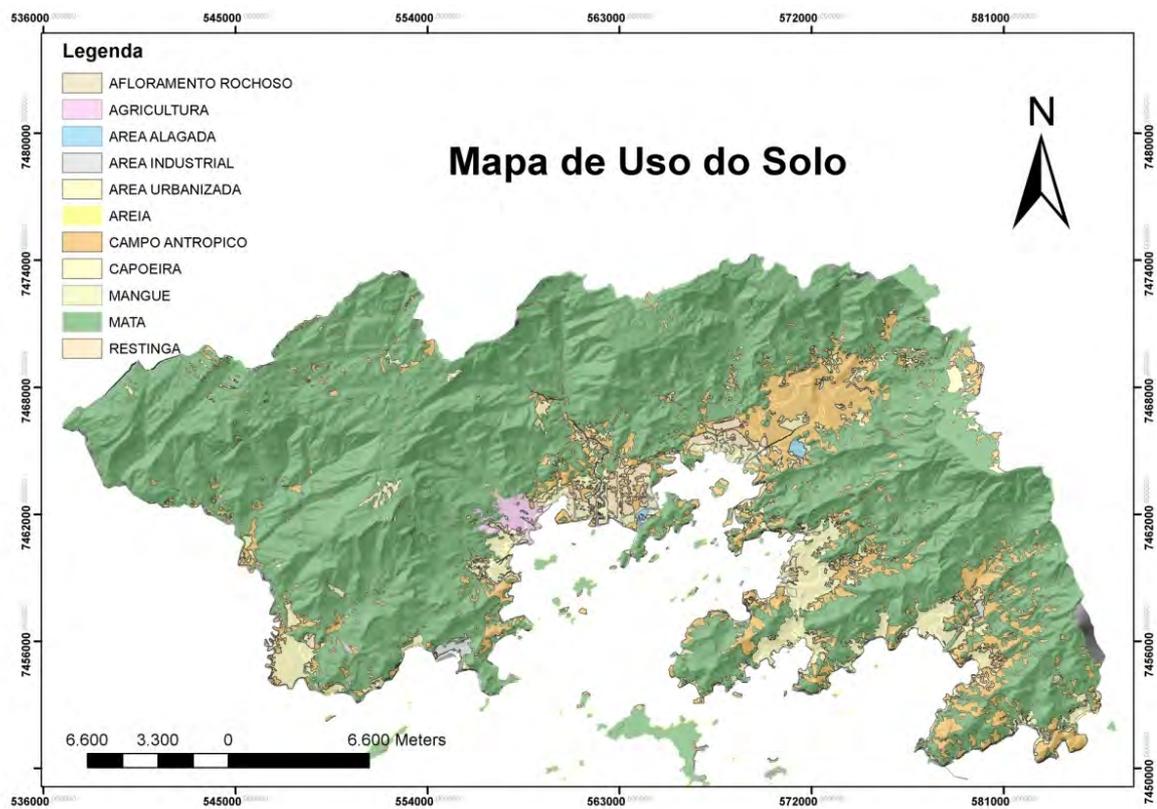


Figura 16. Mapa de uso de solo do município de Angra dos Reis – RJ (Maplan, 2002).

4.4.2 Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) e Extração dos Atributos do Relevo

No software ArcGIS 9.3 foi realizada a interpolação das curvas de nível por meio do interpolador “Topo to Raster” (ArcToolbox – Spatial Analyst Tools - Interpolation – Topo to Raster). Após a geração do MDE, foram feitas as operações de pós-processamento para eliminar as imperfeições como depressões espúrias. Em seguida gerou-se o MDE hidrologicamente consistente para a extração de atributos do relevo: declividade, sombreamento, aspecto, curvatura e índice topográfico de umidade. O modelo digital de elevação foi utilizado para representar a altimetria do município e extrair atributos do relevo através do mesmo. Foram testadas diferentes fontes e resoluções buscando uma representação coerente da altimetria, sendo selecionada após a análise resolução espacial de 10 m.

4.4.3 Modelagem de Suscetibilidade aos Escorregamentos de Terra

A Análise fatorial de correspondência (AFC) foi aplicada com o objetivo de avaliar a importância das condicionantes físicas relacionadas aos escorregamentos de terra, para no futuro ser criado um modelo estatístico de predição no qual possam ser identificadas as variáveis potencialmente influentes, ou seja, as que contribuem de forma independente e significativa para a suscetibilidade de escorregamentos de terra. Além disso, a AFC auxiliou na definição dos pesos e notas de cada variável e respectivas modalidades, contribuindo na avaliação quantitativa do efeito de cada variável e diminuindo a subjetividade para gerar o mapa de suscetibilidade aos escorregamentos de terra. No entanto, para a aplicação dessa análise, foi necessário um conjunto de procedimentos descritos a seguir.

4.4.4 Extração das Variáveis Preditoras e Divisão do Dataset para Treinamento e Validação

Após a organização da base, obteve-se 7 variáveis candidatas para predição (altitude, declividade, curvatura, índice topográfico de umidade, aspecto, uso do solo e classes de solo) e suas respectivas modalidades (68 ao todo). Assim, para cada um dos 384 eventos georreferenciados de escorregamento de terra, extraiu-se através do ArcGIS as modalidades ocorrentes (extract values to points). A tabela de eventos e respectivas modalidades de cada variável preditora constituiu o dataset para desenvolvimento da AFC. O dataset foi então dividido aleatoriamente em dois arquivos, sendo o primeiro de treinamento (75% - 288 eventos) e o outro de validação (25% - 96 dos eventos). Extraíram-se percentuais de escorregamentos de terra em cada classe de suscetibilidade, considerando os 96 escorregamentos separados aleatoriamente do conjunto de dados total.

4.4.5 Codificação das Variáveis e Criação da Matriz de Dados

Devido as variáveis de estudo serem de diferente natureza, quantitativas e qualitativas, foi necessária a codificação das mesmas (Tabela 6). A codificação para classes de solo é mostrada no anexo A.

A codificação permitiu a aplicação de uma variante da Análise Fatorial de Correspondência: a Análise Fatorial de Correspondência Binária (AFGB), no qual trabalha com uma matriz binária 0 ou 1. Assim sendo, os dados são organizados em uma matriz de n linhas x p colunas, onde as linhas são os eventos e as colunas são as variáveis preditoras e suas respectivas modalidades. A matriz é criada de forma que cada evento de M.M (movimento de massa do tipo escorregamento), tem sua modalidade marcada com 1 ou 0, para ocorrência ou não ocorrência dos M.M., como apresentado na logica abaixo:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{se o indivíduo } i \text{ ocorre na modalidade } j \\ 0 - \text{caso contrário} \end{cases}$$

Tabela 6. Codificação das variáveis condicionantes de escorregamento de terra

Altitude (A)	Modalidades (m)
A1	0 – 204
A2	204 – 486
A3	486 – 851
A4	851 – 1185
A5	1185 – 1739
Declividade (I)	Modalidades (%)
I1	0 – 3 – Plano
I2	3 – 8 Suave Ondulado
I3	8- 20 – Ondulado
I4	20 – 45 - Forte Ondulado
I5	45 – 75 – Montanhoso
I6	> 75 – Escarpado
Curvatura (C)	Modalidades
C1	Côncavo
C2	Retilíneo
C3	Convexo
Índice Topográfico de Umidade (TWI)	Modalidades
TW1	< 5
TW2	5 – 10
TW3	10 – 15
TW4	> 15
Aspecto (O)	Modalidades (Graus)
O1	0 - 45
O2	45 - 90
O3	90 - 135
O4	135 - 180
O5	180 - 225
O6	225 - 270
O7	270 - 315
O8	315 - 360
Uso do Solo (U)	Modalidades
U1	Afloramento Rochoso
U2	Agricultura
U3	Área Alagada
U4	Área Industrial
U5	Área Urbanizada
U6	Areia
U7	Campo Antrópico
U8	Capoeira
U9	Mangue

U10	Mata
U11	Restinga

4.4.6 Ensaios Exploratórios e Recodificações

Quando se executa a AFCB é necessário o controle dos processos para que não se obtenha um resultado no qual não se identifica uma relação física entre as variáveis e os eventos que se deseja modelar. Desta forma, foram efetuados ensaios exploratórios com a matriz binária previamente construída, o que permitiu a melhor escolha de variáveis preditoras e a interpretação das relações físicas. As diferentes matrizes de informação utilizadas nos diferentes ensaios foram sujeitas a tratamento pelo software ANDAD 7.10 (IST, 2002). Foram realizados dois ensaios: no primeiro utilizou todas as 7 variáveis, (correspondendo as respectivas 68 modalidades) e a totalidade de 288 observações de escorregamento de terra. Com este primeiro ensaio observou-se de forma geral como as variáveis se comportaram em relação à projeção dos movimentos de massa nos gráficos da análise fatorial de correspondência binária. Observou-se a partir do primeiro ensaio que não existia uma legibilidade e clareza das variáveis na projeção dos eixos, não sendo possível uma interpretação dos dados. Sendo assim, foi efetuado o segundo ensaio com o objetivo de conseguir planos fatoriais adequados para a interpretação das associações entre variáveis.

O processo final de codificação e escolha das variáveis/modalidades implicou na análise de resultados obtidos por diversas pré-codificações ensaiadas em fases exploratórias e que serviram de teste à aplicação da AFCB aos dados em estudo. Houve a necessidade de proceder a diversas recodificações das variáveis para melhor interpretação da análise. Sendo assim, a recodificação foi baseada na observação de frequências das modalidades das variáveis e conhecimento da área de estudo. Depois de vários testes as variáveis escolhidas e recodificadas foram:

Uso do solo:

U1- Englobam classes de uso do solo que apresentam menor suscetibilidade com M.M, (U1, U2, U3, U4, U6, U8, U9 e U11);

Abaixo são apresentadas essas classes e respectivas justificativas.

Agricultura - possui somente 2 registros de escorregamento de terra que se encontram em relevo forte ondulado. A maior parte da agricultura no município ocorre em áreas planas;

Areia e capoeira - são áreas onde não existe a possibilidade de ocorrência de movimento de massa devido à posição na paisagem (maioria baixada arenosa);

Afloramento rochoso - não faz parte do tipo de movimento de massa que estamos estudando e só se observa 1 registro no qual não se encontra formação de solo, ou seja, movimento de massa do tipo rolamento de blocos;

Área alagada, mangue, restinga e área industrial - áreas onde não existe a possibilidade de ocorrência de movimentos, principalmente por serem áreas planas.

UCM- Mata - apesar de boa parte dos dados da literatura avaliar a mata como uso de preservação e de pouca ocorrência de escorregamentos de terra, observa-se escorregamentos na região, mesmo sob cobertura de mata. Assim, essa modalidade foi considerada como tendo suscetibilidade com M.M.

U3C e U4Z- Campo antrópico e Zona Urbana respectivamente são modalidades que demandam maior estudo pelo seu comportamento em relação a outras variáveis. No primeiro ensaio, foi observada a maior frequência dos escorregamentos nessas modalidades.

Classes de solo:

A variável classe de solo foi retirada da análise, pois as unidades de mapeamento de solos, na forma como foram agrupadas e descritas, não adicionam conhecimento novo na análise. Por exemplo, não foi possível discretizar as unidades de mapeamento (associações)

com profundidades de solo diferentes e de forma quantitativa. Comumente, as unidades foram separadas por fases do relevo (declividade e formato da encosta), no entanto essa informação já esta contemplada na variável declividade. Outro aspecto é que fases de profundidade do solo (pouco, profundo, profundo e muito profundo, por exemplo) estão descritas em uma associação (mais de um tipo de solo na mesma unidade de mapeamento), o que torna subjetivo demais a escolha de uma classe de profundidade para representar uma unidade de mapeamento. Outros atributos, tais como retenção de água e condutividade hidráulica, não foram determinados no levantamento de solos que gerou o mapa.

Além disso, o mapeamento de classes de solo não foi realizado em toda área de estudo.

Aspecto:

O aspecto não teve contribuição no primeiro ensaio exploratório, suas frequências são aleatórias, não explicam a relação com os registros.

Altitude:

A altitude também foi retirada uma vez que os registros da base da CPRM foram efetuados apenas na região entre a cota 0 a 500 metros acima do nível do mar. De fato ocorrem eventos em cotas superiores, as quais não foram registradas no dataset devido ao difícil acesso. Assim, optou-se por retirar essa variável para retirar um viés gerado pelo processo de cadastro.

Declividade:

A declividade foi organizada em três modalidades, descritas a seguir:

I1- Compreende as classes de declividades planas, suave ondulada e ondulada (0 a 20 % de declividade). Foram classes que não observaram muita frequência de movimento de massa.

I2- Representam a modalidade com maior frequência de movimento de massa. Compreende as classes de declividade forte ondulada e montanhosa, ou seja, I2 representa I4 e I5.

I6- Relevo Escarpado - declividade (>75%)

Índice topográfico de Umidade:

O índice topográfico de umidade foi codificado da mesma forma descrita na Tabela 6 (TWI1, TWI2, TWI3 e TWI4).

A Tabela 7 apresenta as variáveis e modalidades depois de suas recodificações finais.

Tabela 7. Recodificação final das modalidades das variáveis para AFCB.

Declividade (I)	Modalidades (%)
I1	0 – 3 – Plano
	3 – 8 Suave Ondulado
	8- 20 – Ondulado
I2	20 – 45 - Forte Ondulado
	45 – 75 – Montanhoso
I6	> 75 – Escarpado
Curvatura (C)	Modalidades
C1	Côncavo
C2	Retilíneo
C3	Convexo
Índice Topográfico de Umidade (TWI)	Modalidades
TW1	< 5
TW2	5 – 10
TW3	10 – 15

TW4	> 15
Uso do Solo (U)	Modalidades
U1	Afloramento Rochoso Agricultura Área Alagada Área Industrial Capoeira Mangue Areia Restinga
U4Z	Zona Urbana
U3C	Campo Antrópico
UCM	Mata

AFCB foi aplicada com o objetivo de avaliar a importância das condicionantes físicas relacionadas.

O segundo ensaio foi efetuado usando uma sub matriz da matriz original de dados com as variáveis escolhidas e recodificadas, tendo um menor número de modalidades envolvidas nos diferentes ensaios tornando os resultados de mais fácil interpretação. Este ensaio, considerou a totalidade dos 288 registros de ocorrências de movimento de massa e 4 variáveis originais e 14 modalidades.

A Figura 17 apresenta um exemplo de parte da matriz binária final criada para a AFCB.

Variável	Declividade			Uso do Solo		
Codificação	I1	I2	I6....	U1	U3C	U4Z...
M.M1	1	0	0	1	0	0
M.M2	0	1	0	0	0	1
M.M3	0	1	0	0	1	0
M.M4	1	0	0	0	1	0
.....
M.M 288	1	0	0	0	0	1

Figura 17. Exemplo de parte da matriz binária final criada para AFCB. * M.M - movimentos de massa do tipo escorregamento de terra.

4.4.7 Mapa de Suscetibilidade a Escorregamentos de Terra

A Figura 18 representa o fluxograma com as etapas definidas para a elaboração do mapa de susceptibilidade a escorregamento de terra.

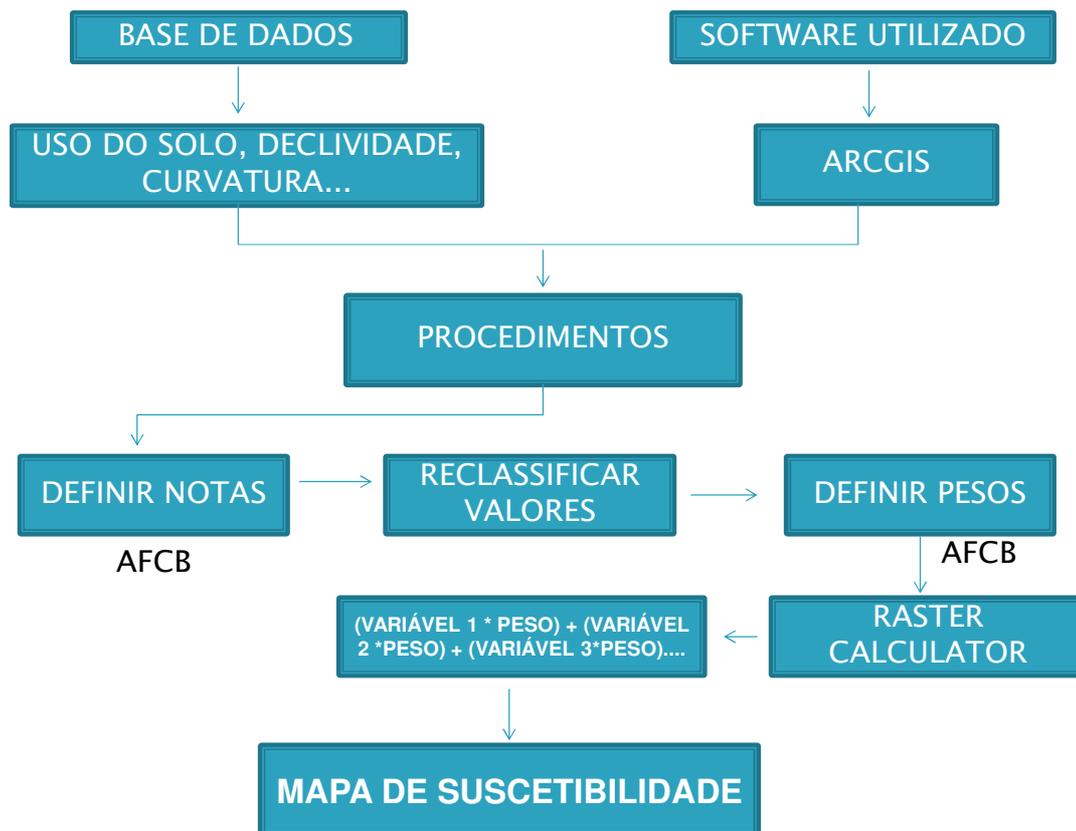


Figura 18. Fluxograma da elaboração do mapa de susceptibilidade a movimentos de massa.

Após a definição das variáveis estudadas foram criados arquivos raster para cada mapa temático e os arquivos temáticos que se encontravam no formato de shapefile foram convertidos em arquivo raster, logo realizada a reclassificação dos mapas através da ferramenta Reclassify na plataforma ArcGIS 9.3.

Foi necessário definir notas de 1 a 10 para cada modalidade de legenda, de maneira que quanto maior for a nota, maior será a susceptibilidade. Depois da reclassificação dos valores, quanto às notas, foi definido os pesos. Esses pesos variam de 0 – 100% (0-1) para cada variável de modo que diferencie o grau de importância e correlação com o fenômeno em questão (susceptibilidade para a ocorrência de movimentos de massa do tipo escorregamento). A operação de ponderação consiste em obter um campo numérico a partir de um campo temático, de tal modo que cada local de uma área de estudo fique associada a um valor, indicando o peso de cada classe temática diante de uma operação quantitativa que se deseje modelar.

Para combinar as variáveis e criar os mapas finais, foi utilizada a ferramenta Spatial Analyst > Raster Calculator, no qual foram inseridos os pesos definidos pelo auxílio da AFCB de cada variável em relação a sua importância e contribuição para a ocorrência dos movimentos de massa do tipo escorregamentos de terra como na fórmula abaixo:

$$S = mt * p + mt * p + mt * p ...$$

Em que:

S = susceptibilidade

Mt = mapa temático da variável de estudo

P = peso de importância da variável de estudo

O mapa foi classificado por quebras naturais no qual as classes são estabelecidas a partir das quebras identificadas pelo ordenamento dos atributos, resultando em classes com valores próximos enquanto as diferenças entre as classes são maximizadas. As cinco principais divisões de suscetibilidade foram: muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa (ESRI, 2004).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Eventos de Escorregamento de Terra

A Figura 19 apresenta a área do município e os pontos de escorregamentos obtidos pela defesa civil de Angra dos Reis-RJ. O histórico de eventos de escorregamento nos últimos anos mostra a elevada suscetibilidade natural da região de Angra dos Reis aos processos dinâmicos em encostas. A frequência com que estes eventos ocorrem sempre está associada à época de verão, já que esse período é onde se tem elevada precipitação.

A falta de outros dados, como o dia em que os eventos ocorreram, dificulta o desenvolvimento de estudos mais aprofundados, pois isso seria uma ótima ferramenta para estudos relacionados ao índice pluviométrico. O monitoramento e organização dos dados pelos órgãos competentes deveriam ser mais detalhados, informando hora, data em dia e mês no qual esses eventos ocorreram e não somente o mês do ano.



Figura 19. Eventos de escorregamento de terra.

4.5.1 Estatística Descritiva

A Tabela 8 mostra as frequências relativas dos escorregamentos de terra nas modalidades das variáveis estudadas, essa frequência foi importante no auxílio da escolha das variáveis para aplicação da análise fatorial de correspondência binária. Os eventos de escorregamentos de terra foram mais frequentes nas seguintes variáveis preditoras e respectivas modalidades: altitude (A1 e A2), declividade (I4 e I5), curvatura (C2), índice topográfico de umidade (TWI2), uso do solo (U7 e U5) e classes de solo (PVAd2, PVAd7, PVAd10 e CXbd1). No entanto, em relação às variáveis altitude e classes de solo devemos lembrar algumas considerações:

Os registros da base de dados para altitude foram efetuados apenas na região entre a cota 0 a 500 metros, ou seja, suas frequências podem ter sido altas nas modalidades A1 e A2 devido à falta de registros dos eventos em cotas superiores.

Na variável classe de solo, além do seu mapeamento não cobrir toda a área de estudo as unidades de mapeamento de solos, na forma como foram agrupadas e descritas, não adicionam conhecimento novo na análise.

A variável: aspecto não apresenta uma modalidade ou grupo de modalidade com maior frequência de eventos.

Os dados da tabela de frequência, independente da AFCEB, já demonstram quais variáveis tem maior potencial para serem utilizadas como preditoras de escorregamentos de terra no município. Por exemplo, as modalidades das variáveis altitude, aspecto e classe de solo provavelmente não implicam em aumento significativo na explicação dos eventos.

Tabela 8. Frequência relativa das ocorrências de movimento de massa dentro das modalidades das variáveis condicionantes.

Variável	Codificação	Frequência Relativa
Altitude	A1	305 (79,42%)
	A2	70 (18,22%)
	A3	8 (2,1%)
	A4	1 (0,26%)
Declividade	I2	4 (1%)
	I3	19 (5%)
	I4	188 (49%)
	I5	151 (39%)
	I6	21(6%)
Curvatura	C1	60 (16%)
	C2	233 (61%)
	C3	90 (23%)
Índice Topográfico de Umidade	TWI1	1 (1%)
	TWI2	371 (96%)
	TWI3	10 (2%)
	TWI4	1 (1%)
Aspecto	O1	41 (11%)
	O2	37 (10%)
	O3	63 (16%)
	O4	62 (16%)
	O5	23 (6%)
	O6	24 (6%)
	O7	68 (18%)
	O8	65 (17%)
Uso do Solo	U1	1 (0,31%)
	U2	2 (0,62%)
	U5	75 (20%)
	U6	1 (0,31%)
	U7	221 (57,55%)
	U8	5 (1,54%)
	U10	18 (5,55%)
	U11	1 (0,31%)
	PVAd1	16 (4%)
	PVAd2	77 (20%)
	PVAd4	5 (1%)
	PVAd5	20 (5%)
	PVAd6	22 (6%)

Classes de Solo		
	PVAd7	63 (16%)
	PVAd8	7 (2%)
	PVAd10	49 (13%)
	CXbd1	68 (18%)
	CXa1	25 (6,51%)
	CXbd2	1 (1%)
	CXbd3	5 (1%)
	CXbd4	4 (1%)
	CXbd5	12 (3%)
	GXbdt	3 (1%)
	GZoi	4 (1%)
	RLd	2 (1%)

4.5.1 Análise Fatorial de Correspondência Binária (AFCB)

Realizada a AFCB dos 288 registros, gerou-se o gráfico scree plot apresentado na Figura 20 e os dados da Tabela 9. O gráfico mostra a contribuição de cada eixo na variância total dos dados.

A determinação do número apropriado de componentes corresponde a maior variabilidade e geralmente é definido no ponto onde o gráfico apresenta uma curva acentuada, à semelhança de um cotovelo, ou seja, é o número de fatores à esquerda do ponto de inflexão, no entanto a escolha de fatores foi escolhida com base também na contribuição da taxa de explicação e acumulada que pode ser observada na Tabela 9.

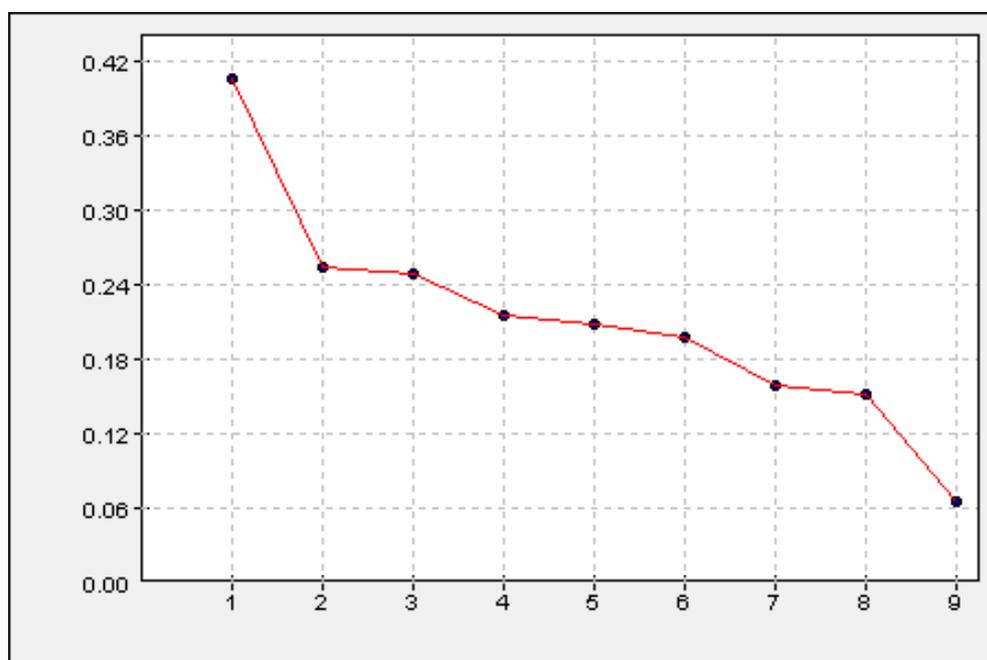


Figura 20. Scree plot, eixo y autovalores, eixo x número de componentes.

A importância de cada um dos eixos é analisada pela taxa de inércia transportada (coluna % Exp da Tabela 9). Assim sendo, verifica-se, por exemplo, que o primeiro fator explica aproximadamente de 21% da variabilidade contida na matriz de dados. Considerando os 9 eixos de inércia, atingiu-se a percentagem acumulada de 99,873% (% Acum).

Tabela 9. Taxa de explicação e sua acumulada

Id Eixo de Inércia	Valor Próprio	% Exp	% Acum
1	0,406	21,278	21,278
2	0,254	13,307	34,585
3	0,249	13,035	47,620
4	0,216	11,325	58,944
5	0,207	10,876	69,820
6	0,197	10,334	80,154
7	0.158	8,287	88,441
8	0.152	7,982	96,423
9	0.066	3,450	99,873

De acordo com o scree plot e as taxas de explicação e suas acumuladas, foram escolhidos 6 fatores, uma vez que esses explicam mais de 75% da variância total (80,154%). Para se identificar as variáveis mais representativas na construção de cada eixo, consideraram-se aquelas que possuem contribuições absolutas superiores a 7,14 ($100/14 = 7,14$), ou valor de coordenada superior a $\pm 0,5$.

As tabelas dos valores de contribuição absoluta e coordenadas são apresentadas nos anexos D e E. Fundamental no entendimento das relações entre os eventos de escorregamentos de terra e as variáveis e respectivas modalidades, é a projeção fatorial das correspondentes binárias. As Figuras 21, 22, 23, 24 e 25 compreendem as projeções fatoriais das correspondências binárias, considerando os planos de projeção 1/2, 1/3, 1/4, 1/5 e 1/6 dos fatores. As Figuras 26, 27, 28, 29 e 30 compreendem os mesmos planos (1/2, 1/3, 1/4, 1/5 e 1/6), porém com a nuvem de movimentos de massa do tipo escorregamento de terra.

A circunferência verde corresponde aos grupos onde se encontram as modalidades mais correlacionadas e que existe uma contribuição no eixo fatorial. As setas verdes correspondem à correlação negativa entre os grupos de contribuição nos eixos fatoriais. A circunferência vermelha corresponde as variáveis que não contribuem expressivamente nos eixos fatoriais, pois estão mais próximas do centro ou distância de origem.

De acordo com as contribuições absolutas ou valores de coordenadas, podemos observar, por exemplo, que no plano fatorial 1/2 (Figura 21), as variáveis que possuem maior contribuição no 1º Eixo (eixo horizontal) são: UCM, C3, C1, TWI1, TWI3, TWI4, U1 (representada pelas modalidades, U1, U2, U3, U4, U6, U8, U9 e U11) e I1 (representada pelas modalidades, I1, I2, I3), estas são destacadas por círculos verdes representando os grupos de variáveis com correlação entre si, como U1, I1, TWI3, TWI4 e TWI1 correlacionados negativamente com o grupo de variáveis UCM, C3, C1. Podemos observar também que as modalidades U3C, C2, TWI2, I2 (representada pelas modalidades I4 e I5) e UZ4 contribuem muito pouco no 1º eixo se aproximando muito a origem, não sendo assim muito representativas no eixo fatorial 1, uma vez que estas conduzem a coordenadas ou valores de contribuição absoluta baixos. No geral, os valores de coordenadas e contribuição absoluta das variáveis representativas no plano fatorial 1/2 se comportam na mesma semelhança que nos outros planos fatoriais.

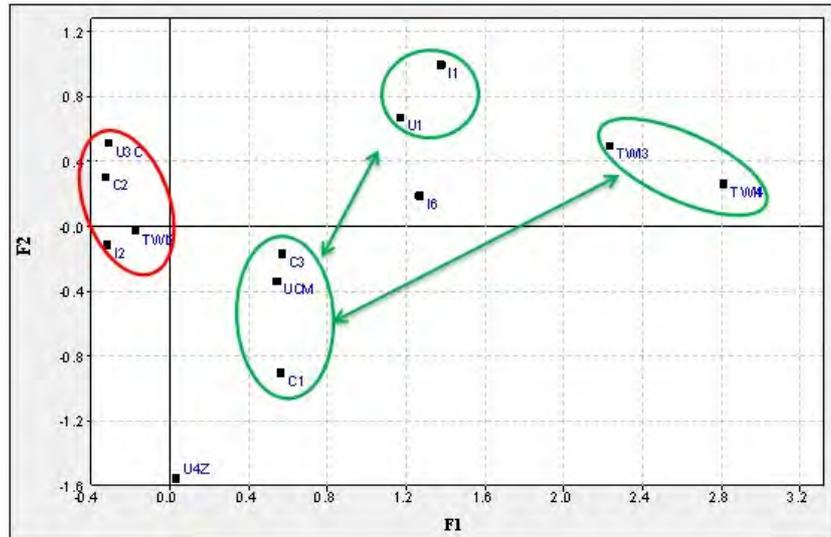


Figura 21. Projeções das variáveis no plano fatorial 1,2

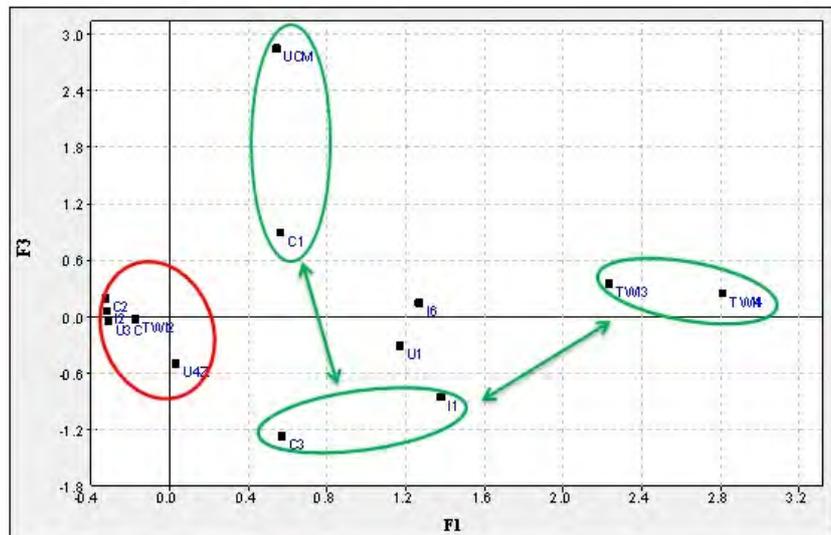


Figura 22. Projeções das variáveis no plano fatorial 1,3

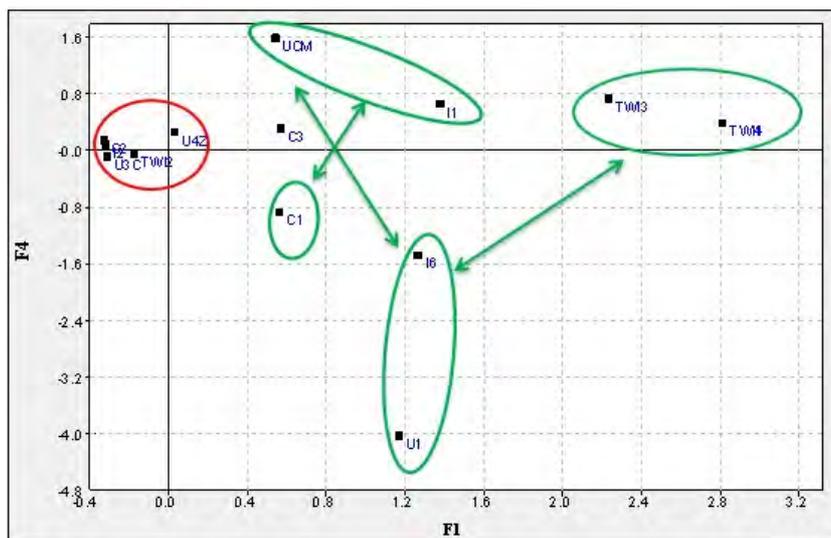


Figura 23. Projeções das variáveis no plano fatorial 1,4

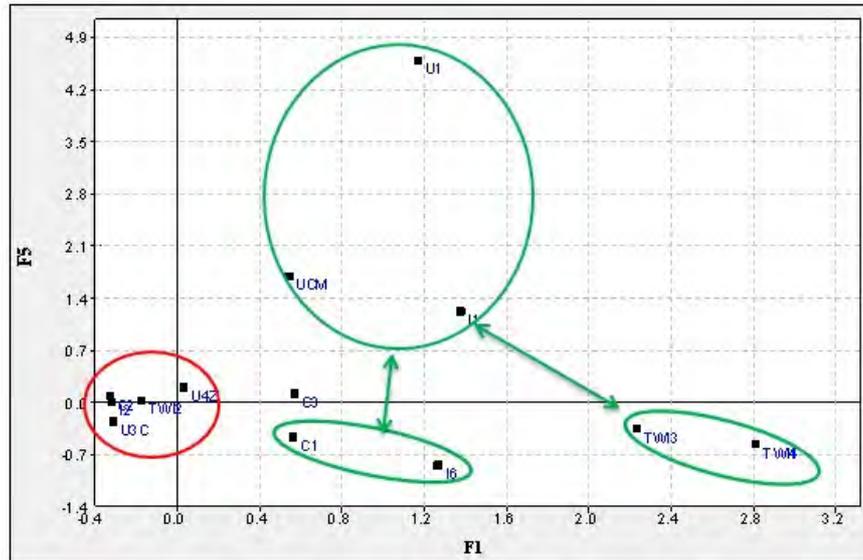


Figura 24. Projeções das variáveis no plano fatorial 1,5

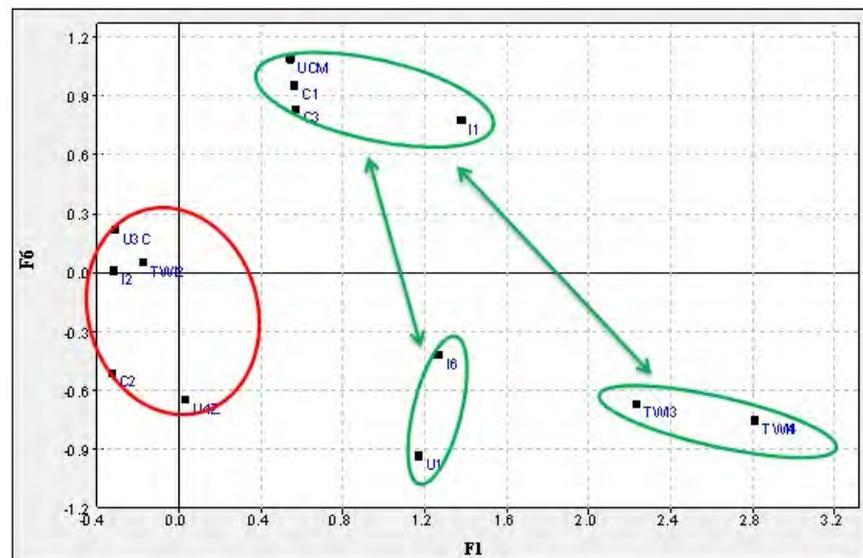


Figura 25. Projeções das variáveis no plano fatorial 1,6

U3C, TWI2, I2 e U4Z são modalidades onde o número de frequência de escorregamentos de terra é alto, isso pode ser observado através da sobreposição destas modalidades na nuvem de escorregamento de terra, Figuras 26, 27, 28, 29, 30. Em todos os planos fatoriais a maior parte da nuvem de escorregamento de terra se concentra na distância de origem ou centro dos eixos fatoriais, junto as variáveis U3C, TWI2, I2 e U4Z.

Quando observamos as modalidades UCM, C3, C1, TWI1, TWI3, TWI4, U1 e I1 sobrepostas à nuvem dos movimentos de massa, não estão sobrepostas com a maioria desses eventos, ou seja, essas seriam modalidades, que explicam a menor suscetibilidade a escorregamentos de terra.

De acordo com a observação dos valores das contribuições, coordenadas e sobreposição das modalidades sobre a nuvem de escorregamento de terra, a decisão final das modalidades, que explicariam mais a suscetibilidade para os eventos de escorregamento de terra são: U3C, TWI2, I2 e U4Z.

Como o objetivo seria usar valores numéricos para a construção das notas e pesos em relação à importância das modalidades nos escorregamentos de terra e as modalidades que

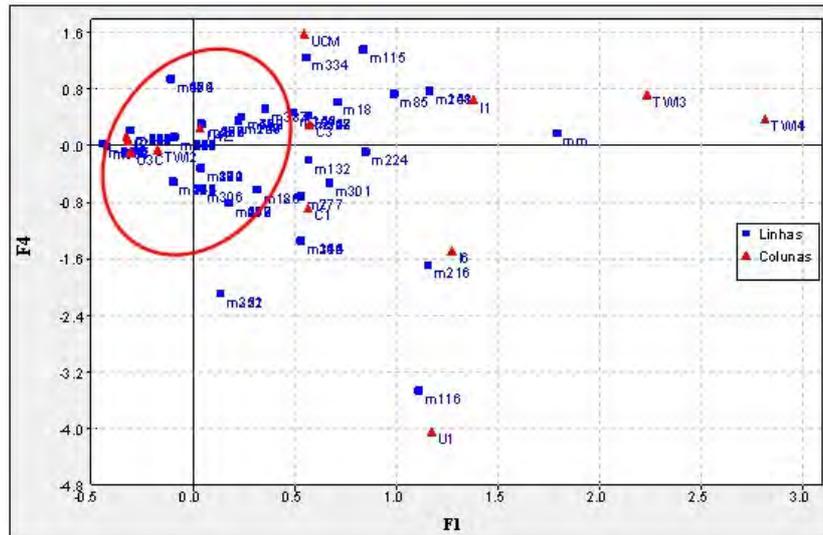


Figura 28. Projeções das variáveis com os movimentos de massa no plano fatorial 1,4.

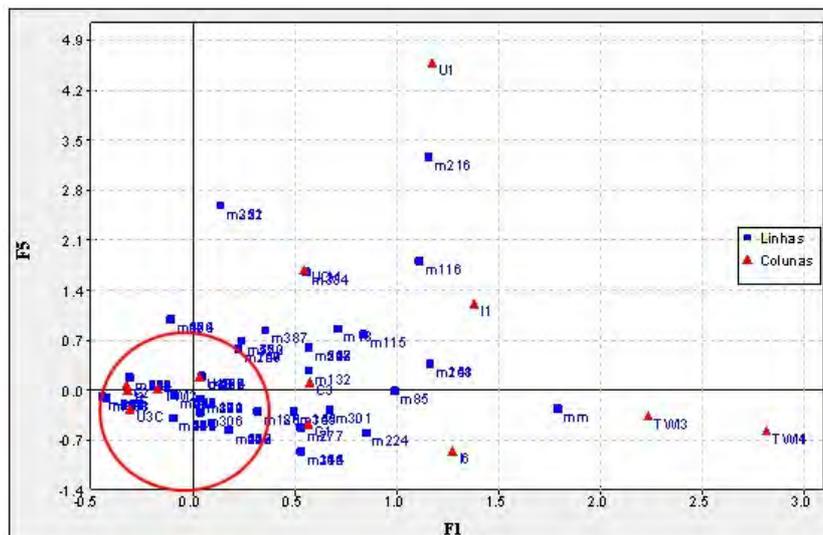


Figura 29. Projeções das variáveis com os movimentos de massa no plano fatorial 1,5.

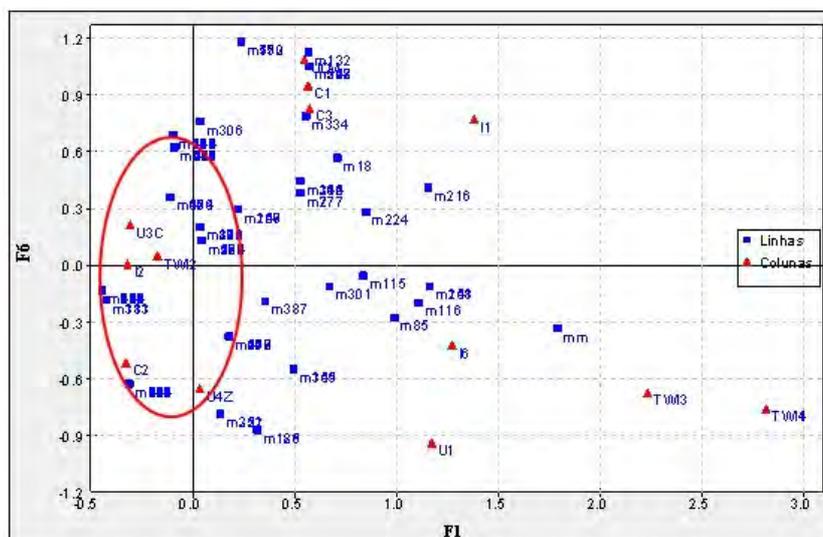


Figura 30. Projeções das variáveis com os movimentos de massa no plano fatorial 1,6.

As notas de risco para as modalidades das variáveis: uso do solo, declividade, curvatura e TWI foram atribuídas da mesma forma que os pesos das variáveis, ou seja, quanto maior a nota, menor o risco da classe para o potencial de escorregamento de terra, essas notas podem ser observadas na Tabela 11.

Tabela 10. Contribuições absolutas nos eixo 1, 2, 3, 4, 5 e 6 para definição de pesos e notas.

ID	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4	Eixo 5	Eixo 6	Soma	Nota
U1	1,63	0,834	0,184	36,338	48,445	2,124	89,555	10
UCM	0,882	0,547	38,826	13,953	16,38	7,212	77,8	9
U3C	3,885	16,683	0,216	0,816	5,939	3,871	31,41	3
U4Z	0,018	52,24	5,34	1,508	1,019	11,754	71,879	8
I1	7,874	6,54	5,019	3,295	11,795	5,088	39,611	10
I2(I4I5)	5,102	1,047	0,208	0,501	0	0,002	6,86	2
I6	7,654	0,259	0,15	19,726	6,793	1,758	36,34	9
C1	3,268	13,55	13,181	14,621	4,547	18,906	68,073	10
C2	4,108	5,485	2,108	1,272	0,514	21,537	35,024	5
C3	4,143	0,604	33,492	2,125	0,365	17,768	58,497	8
TWI1	17,199	0,226	0,199	0,588	1,369	2,543	22,124	7
TWI2	1,741	0,118	0,054	0,334	0,081	0,327	2,655	1
TWI3	20,607	1,578	0,768	4,174	1,011	3,874	32,012	10
TWI4	21,889	0,288	0,253	0,749	1,742	3,236	28,157	9
Total							452,169	
Peso Final %	Uso do solo 37	Declividade 16,8	Curvatura 28	Índice T. umidade 18,2	Total 100			

Tabela 11. Notas distribuídas referentes às modalidades das classes

Id	Nota	Id	Nota	Id	Nota	Id	Nota
U1	10	I1	10	C1	10	TWI1	7
U2	10	I2	10	C2	5	TWI2	1
U3	10	I3	10	C3	8	TWI3	10
U4	10	I4	2	-	-	TWI4	9
U5	8	I5	2	-	-	-	-
U6	10	I6	9	-	-	-	-
U7	3	-	-	-	-	-	-
U8	10	-	-	-	-	-	-
U9	10	-	-	-	-	-	-
U10	8	-	-	-	-	-	-
U11	10	-	-	-	-	-	-

Após as etapas relacionadas ao geoprocessamento e SIG, obteve-se o mapa de suscetibilidade à ocorrência de escorregamento de terra que pode ser observado na Figura 31.

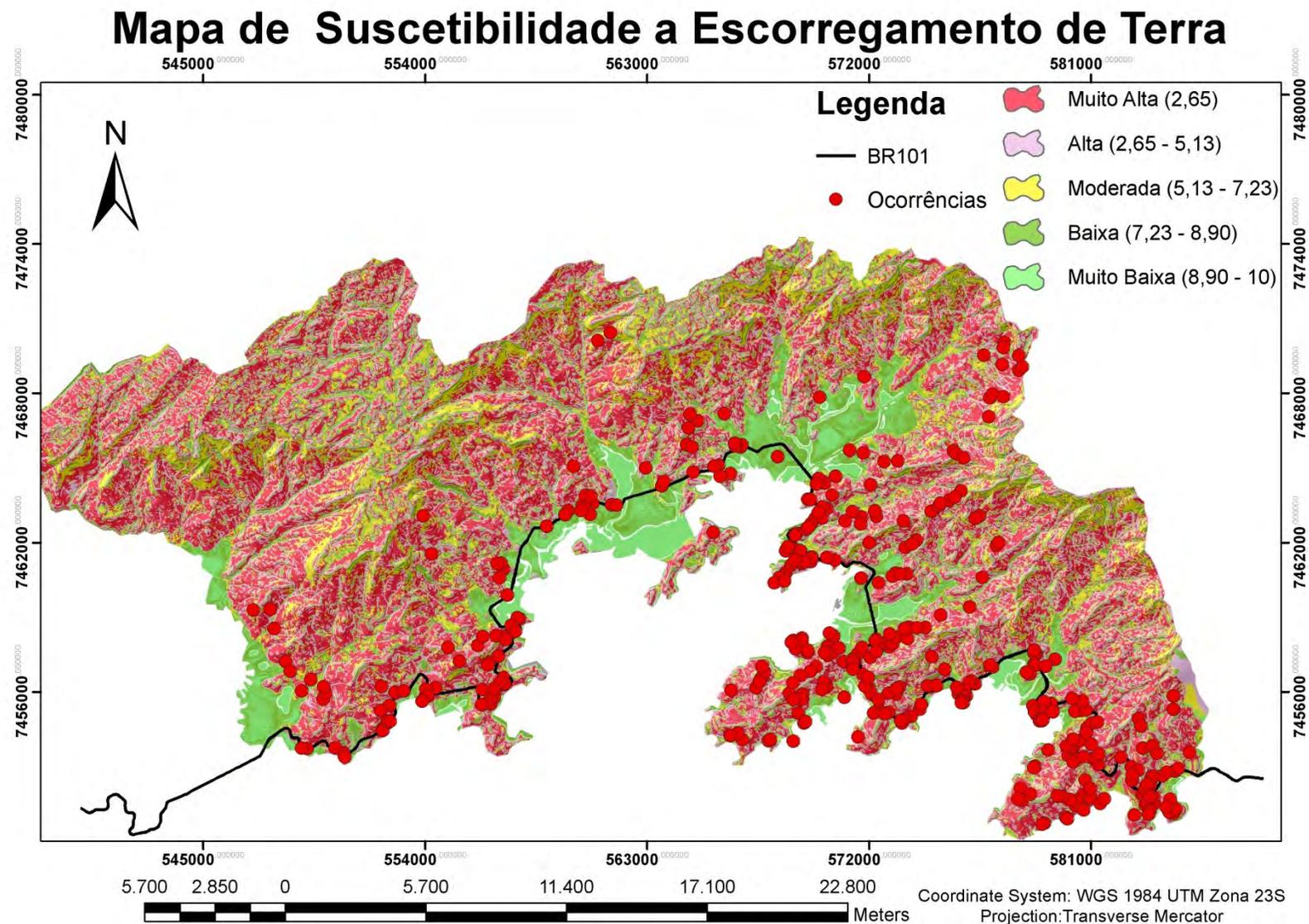


Figura 31. Mapa de suscetibilidade do município de Angra dos Reis-RJ com os registros de movimento, hidrografia e estrada BR101.

Tabela 12. Classes de suscetibilidade e respectivas áreas e porcentagem de ocorrência

Classes de Suscetibilidade	Área (ha)	% Área
Muito Alta	21464,38	34,63
Alta	16834,88	27,15
Moderada	9300,31	15
Baixa	10026,86	16,17
Muito Baixa	4371,91	7,05
Total	61998,34	100

Observando a Tabela 12, as duas classes de suscetibilidade mais elevadas muito alta e alta ocupam cerca de 60% da área de estudo.

Aproximadamente 23,22% da área de Angra dos Reis, o que equivale a 14398,8 ha, possui suscetibilidade muito baixa e baixa à ocorrência de escorregamento de terra. Essas classes localizam-se preponderantemente nas faixas mais próximas ao mar. Essas áreas reúnem condicionantes naturais pouco propícias à ocorrência de escorregamentos de terra compreendendo em sua maioria a combinação das modalidades U1, C1, C3, TWI1, TWI2, TWI3 e algumas situações com as modalidades U3C e U4Z com declividade baixa.

As classes de suscetibilidade muito alta e alta abrangem uma área de 61,78%, correspondente a 38399,26 há. Essas classes são observadas em todo o município onde se encontram entremeadas com a classe de suscetibilidade moderada. Esta última representa 15% da área do município. As modalidades que mais representam as classes muito alta e alta são U3C, U4Z, I2, C2 e TWI2.

Na Figura 32 são apresentados os resultados da validação do mapa de suscetibilidade.

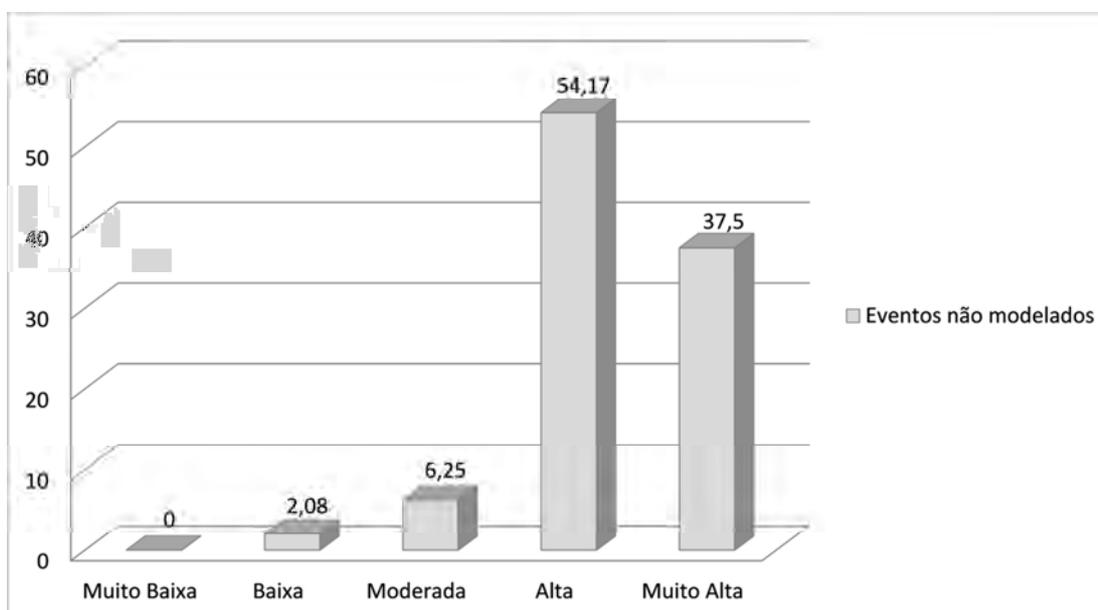


Figura 32. Distribuição dos eventos de movimento de massa não modelados nas diferentes classes de suscetibilidade.

Observando a Figura 32, os eventos de movimentos de massa foram inseridos, principalmente, na classe de suscetibilidade alta, com 54,17% do total. A classe muito alta abrangeu, por sua vez, 37,52% dos registros. Já nas classes moderada e baixa o número de movimentos de massa foi reduzido, com apenas 6,25 e 2,08 % do total. Por fim, a classe de suscetibilidade muito baixa não apresentou nenhuma ocorrência, como esperado. Os

resultados obtidos permitem inferir que aproximadamente 91,69% dos futuros escorregamentos de terra em Angra dos Reis provavelmente ocorrerão nas áreas com suscetibilidade alta e muito alta, as quais ocupam 60% da área do município.

O mapa de susceptibilidade ao movimento de massa da área em estudo apresentou nas classes muito alta e alta, evidências de que grande parte das encostas são íngremes e retilíneas, bem como se encontra em processo de grande instabilidade, sujeitas a ocorrências de escorregamento de terra, decorrentes principalmente do fator declividade, aliado aos eventos de precipitação e uso de solo de campo antrópico.

De maneira geral, o mapa de suscetibilidade elaborado é satisfatório. Assim como esperado, a maior parte dos escorregamentos de terra pretéritos foi inserida nas classes de suscetibilidade muito alta e alta e ocorreu a ausência de registro na classe de suscetibilidade muito baixa, no entanto a falta de dados de algumas variáveis como profundidade do solo e capacidade de infiltração pode alterar a proporção das classes, sobretudo aquelas classificadas como alta e muito alta.

4.6 CONCLUSÕES

De acordo com a validação do mapa de suscetibilidade a escorregamentos de terra, podemos dizer que a AFCB permitiu o auxílio na escolha das variáveis mais determinantes na ocorrência de escorregamento de terra, quais sejam: declividade e curvatura das encostas, uso do solo e índice topográfico de umidade.

A AFCB também permitiu o auxílio na definição dos pesos e notas das modalidades dessas variáveis, reduzindo um pouco a subjetividade na geração do mapa de suscetibilidade ao escorregamento de terra.

Os resultados de validação do mapa permitem inferir que aproximadamente 92% dos futuros movimentos de massa em Angra dos Reis provavelmente ocorrerão nas áreas com suscetibilidade alta e muito alta, as quais ocupam 60% da área do município. As classes alta e muito alta basicamente ocorrem em encostas com declividade ondulada e forte ondulada e com formato retilíneo, com índice topográfico de umidade entre 5 a 10 e sob uso urbano e campo antrópico.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Considerando as informações hoje disponíveis sobre registros de movimentos de massa e de material cartográficos e de sensores orbitais do município de Angra do Reis, é possível apresentar as seguintes conclusões:

A área urbana do município esta em crescente expansão, dobrando de 23 km² para 47 km² no período de 1984 a 2014.

A expansão urbana se intensificou no período de 2010 a 2014, sendo que algumas áreas ainda foram ocupadas em direção a encostas declivosas, como por exemplo, a classe forte ondulada.

De acordo com a validação do mapa de suscetibilidade a escorregamentos de terra, podemos dizer que a AFCB permitiu auxílio na escolha das variáveis mais determinantes na ocorrência de escorregamento de terra, quais sejam: declividade e curvatura das encostas, uso do solo e índice topográfico de umidade. A AFCB também permitiu o auxílio na definição dos pesos e notas das modalidades dessas variáveis, reduzindo um pouco a subjetividade na geração do mapa de suscetibilidade ao escorregamento de terra.

Os resultados de validação do mapa permitem inferir que aproximadamente 92% dos futuros movimentos de massa em Angra dos Reis provavelmente ocorrerão nas áreas com suscetibilidade alta e muito alta, as quais ocupam 60% da área do município. As classes alta e muito alta basicamente ocorrem em encostas com declividade ondulada e forte ondulada e com formato retilíneo, com índice topográfico de umidade entre 5 a 10 e sob uso urbano e campo antrópico.

6. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

As maiores dificuldades encontradas durante a realização desse estudo foram a falta de detalhes referentes à base de registros de movimentos de massa e de certas variáveis como informações dos atributos físicos do solo, os quais ainda não foram mapeados no município de Angra dos Reis-RJ.

Apesar de a AFCB ter reduzido a subjetividade no processo de geração do mapa de suscetibilidade, a adequação deste método é diretamente relacionada à seleção dos critérios e das regras de decisão de codificações das variáveis, sendo esta a etapa que deve exigir maior estudo e atenção.

Nas áreas mapeadas como muito alta e alta, a expansão urbana deve ser evitada. As áreas classificadas como de suscetibilidade muito alta e alta devem ser desocupadas e/ou monitoradas, para reduzir ou evitar perdas econômicas e de vidas, como se deu no ano de 2010.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, R., GÓIS, J., REQUENA, J., & HERNÁNDEZ, O. (2011). Modelos Estatísticos Multivariados Aplicados no Estudo de Movimentos de Massa na Bacia Hidrográfica de Suchiate - Guatemala.

ANTUNES, M.A.H., DEBIASI, P., COSTA, A.R., GLERIANI, J.M., Correção atmosférica de imagens ALOS/AVNIR-2 utilizando o modelo 6S. Revista Brasileira de Cartografia, v. 64, p. 531-539, 2012.

ARAUJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. Gestão Ambiental de Áreas Degradadas. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 2005. 320p.

AUGUSTO FILHO, O. 1994. Cartas de Risco de Escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Escola Politécnica – Universidade de São Paulo. São Paulo.

BARROS, E.J. Carta de risco de movimentos gravitacionais de massa, zona norte dos morros de Santos, SP, com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas. 2001. 149f. (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

BERMÚDEZ, F.L., ROMERO, A.D., FERNANDEZ, J. M., FERNANDEZ, J.M. Vegetation and soil erosion under a semi-arid mediterranean climate: a case study from Murcia (Spain). Geomorphology, v. 24, p.51 – 58, 1998.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. 1990. Conservação do solo. São Paulo: Ícone.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Erosão. In: BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. 4ª. ed. São Paulo: Ícone, 1999. Cap. 7, p. 68-93.

BIGARELLA, J. J. Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2003. 1026 p.

BINS, L. S.; FONSECA, L. M. G.; ERTHAL, G. J.; MITSUO, II, F. Satellite Imagery Segmentation: A region Growing Approach., VII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Salvador. Brasil, 1996. Anais. São José dos Campos: INPE, 1996

BRICE J B (1966) – Erosion and deposition in the loess-mantled Great Plains, Medicine Creek drainage basin, Nebraska. U.S.Geological Survey Professional Paper 352H: 235-339.

BRITES, R.S.; SOARES, V.P.; RIBEIRO, C.A.A.S. Verificação da exatidão em classificação de uma imagem orbital mediante a utilização de três índices. Revista Árvore. Viçosa, v. 20, n. 3, p. 415-424, 1996.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS. U.M.; GARRIDO, J. Spring, Integrating remote sensing and GIS by object oriented data modelling. Computers and Graphics, v. 15, n. 6, p. 395-403, 1996.

CARVALHO JÚNIOR, W. de. Classificação supervisionada de pedopaisagens no domínio dos mares de morros utilizando redes neurais artificiais. Tese de doutorado. UFV, 2005. 160p.

CONGALTON, R; GREEN, K 1999. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. Lewis Publishers, USA. 1999b.

CORONADO, J. A.. Avaliação da Suscetibilidade a Deslizamentos por Meio do Uso de Sistema de Informação Geográficos: Aplicação em uma Área do eixo Cafeteiro Colombiano. Dissertação de Mestrado. Brasília - DF, Universidade de Brasília, 2006.

CORREIA, V. R. de M. et al. (2007) Uma aplicação do sensoriamento remoto para a investigação de endemias urbanas. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 23, n. 5.

CRÓSTA, A.P. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. 3 ed. IGUNICAMP. 170 p. 1992.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP usando imagens Landsat-5. RA E GA, Curitiba, v. 21, p. 234-271, 2011.

DIKAU, R. Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. Zeitschrift für Geomorphologie, 1990.

ESRI. What is Arc GIS? Disponível em: www.esri.com. Acesso em: julho/2015.

FERNANDES, N. F & AMARAL, C. P. 1996. Movimentos de massa: uma abordagem geológica geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (org) Geomorfologia e Meio Ambiente. Bertrand, Rio de Janeiro. p.123-194.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C.P (2003). Movimentos de Massa: Uma Abordagem Geológica-Geomorfológica. In: Geomorfologia e Meio Ambiente. p. 123-186. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2003. 372 p.

GALLO, K. P., TARPLEY, J. D. The comparison of vegetation index and surface temperature composites of urban heat-island analysis. International Journal of Remote Sensing, v. 17, n. 15, p. 3071-3076, 1996.

GUANZIROLLI, C. H. Contribuição à reflexão sobre o processo de produção de um espaço regional- O caso de Angra. Tese de Doutorado do Curso de Pós-graduação em Urbanismo, UFRJ. 230p. Rio de Janeiro. 1983.

GUIDICINI, G.; IWASA O.Y. Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido. São Paulo. IPT, 1976.

HICKEY, R.; SMITH, A.; JANKOWSKI, P. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID: Computers, Environment and Urban Systems, v. 18, n. 5, p. 365-380. 1994.

HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. International Agrophysics, v.4, n.4, p.367-376, 1988.

INBAR, M.; TAMIR, M.; WITTENBERG, L. Runoff and erosion process after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. Geomorphology, v. 24; p. 17-33, 1998.

INFANTI JUNIOR, N. & FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 9, p.131-152.

INEA, Elaboração do plano estadual de recursos hídricos do estado do rio de janeiro, 2014.14p.

INPE. Spring: Tutorial de Geoprocessamento: Classificação de imagens. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/classific.html>>. Acesso em 27 de julho de 2014.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.. Controle de erosão. DAEE-IPT, S. Paulo, 1989.

IST, Manual do utilizador - Programa ANDAD (Versão 7.10). Centro de Geosistemas do Instituto Superior Técnico 2002.

JENSEN, J.R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.

LAGO, J.C. Conservação do Solo. Princípios e Previsão de Perdas. Pelotas. FAEM/UFPel. 1985. 113p.

LAL, R. (1998). Agronomic consequences of soil erosion. In: PENNING DE FRIES, F.W.T., AUGS, F. e KERR, E.J. (orgs.) Soil erosion at multiple scales principles and methods for 33 assessing causes and impacts. Oxford: Cabi Publishing.

LIMA, S. L. Características da rede de drenagem e do relevo de três solos do estado de São Paulo, determinadas em fotografias aéreas e cartas planialtimétricas.1987. 100 f. (Tese de Doutorado)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

LISTO, F. L. R.; VIEIRA, B. C. Análise de condicionantes topográficos como subsídio para avaliação de áreas de risco a escorregamentos rasos, Revista de Geografia, v. 27, n. 3, p. 204, 2010.

KOPPEN, W. 1948. Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra. Publications In: Climatology. Laboratory of Climatology, New Gersey. 104p.

MARTELLONI G, SEGONI S, FANTI R, CATANI F. Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. Landslides v.9., 2012.

MATTOS, L. C. M. Considerações sobre as limitações pedológicas e aptidão das terras na produção de um espaço regional- Um subsídio ao planejamento de ocupação das terras de Angra dos Reis/ RJ, 1991.

MCKENZIE NEIL J., RYAN PHILIP J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. Geoderma 89, 67, 1999.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: UnB/Cnpq, 2012. p. 191-208.

MONTGOMERY, C.W. Environmental geology. 3ª ed. Dubuque: Wm. C. Brown Publishers, 1992. 465p.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. São José dos Campos: INPE, 2001. 250 p.

MOREIRA, M.A.; SHIMABUKURO, Y.E. Cálculo do Índice de vegetação a partir do sensor AVHRR In: Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N. São Paulo, Oficina de Textos, 2004, cap.4: 79-101.

MURCK, B.W.; SKINNER, B.J. & PORTER, S.C. Environmental geology. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996. 535p.

NELSON, S. (2009). Natural Disasters – Lecture Notes. Tulane University: <http://www.tulane.edu/~sanelson/geol204/index.html>

NICHOL, J. E. Analysis of the urban thermal environment with LANDSAT data. Environment and Planning B: Planning and Design. v. 23., p. 799-747, 1996.

NOVO, E.M.L. de M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. São Paulo: Edgard Blucher, 1989, 307p.

OLDEMAN, L. R., Hakkeling, R. T. A. and Sombroek, W.G. (1990). World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation. Wageningen, International Soil Reference and Information Centre.

OROZCO, J.C. Análise de imagens de séries temporais NDVI do sensor MODIS na Microrregião de Vilhena. Monografia de final de curso, Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia, DF, 2013.

PMAR - Prefeitura Municipal de Angra dos Reis. Secretaria Municipal de Planejamento.

PROIN/CAPES e UNESP/IGCE. Material Didático: arquivos de transparências (CD). Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada, 1999.

REIS, F.A.G.V. Curso de Geologia Ambiental via Internet. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

RICKSON, R.J. Simulated vegetation and geotextiles. In: MORGAN, R. P. C.: RICKSON, R.J.(Ed.). Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach. London: E & FN Spon, 1995. p.95-125.

ROSA, R. Introdução ao Sensoriamento Remoto, Uberlândia: EDUFU, 2003.

SALOMÃO, F. X. de T. & IWASA, O. Y. 1995. Erosão e a ocupação rural e urbana. In: Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. ABGE/IPT – DIGEO. p. 31-57.

SANTOS, M. de L. M., SANTOS, H. G. DOS, DART, R. de O, PARES, J. G. Mapeamento Digital de Classes de Solos no Estado do Rio de Janeiro. Dados eletrônicos – Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. 28p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678- 0892 ; 119)

SELBY, M.J. Hillslope Materials and Processes. Oxford: Oxford.1982. Pressovimentos

SPRING 4.0 (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas). 2003. Disponível em: www.dpi.inpe.br/spring/ Acesso em: 05 março 2003

SILVEIRA, R.M. de P., SILVEIRA, C. de T., FIORI-OKA, C., .Análise digital do relevo empregada no mapeamento de unidades geomorfológicas. Revista Geografar Curitiba, v.7, n.2, p.43-68, dez./2012.

TOMINAGA, L., SANTORO, J., AMARAL, R. Instituto Geológico. Desastres naturais: Conhecer para prevenir. 2009.

VARNES, D.J. Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice. UNESCO, Paris, França, 1985.

VERMOTE, E.F.; D. TANRÉ, J. L. DEUZÉ, M. HERMAN J.-J. MORCRETE, Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 35. n. 3, p. 675-686, 1997.

VERMOTE, E.F.; D. TANRÉ, J. L. DEUZÉ, M. HERMAN, J.-J. MORCRETE, Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 35. N. 3, p. 675-686, 1997.

VICTORIA, D. de C. / ANDRADE, R. G. / PAZ, A. R., Série temporal de imagens EVI/MODIS para discriminação de formações vegetais no Pantanal. Geografia, Rio Claro, v. 34, Número Especial, p. 721-729, dez. 2009.

WILSON, J.S.; et al. Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems with remote sensing. Remote Sensing of Environment, v.86, n.3, p. 303-321, 2003.

WU, T.H.; MCKINNELL, W. P.; SWANSTON, D. N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Canadian Geotechnical Journal, v.16, n.1, p. 19-33, Feb.1979.

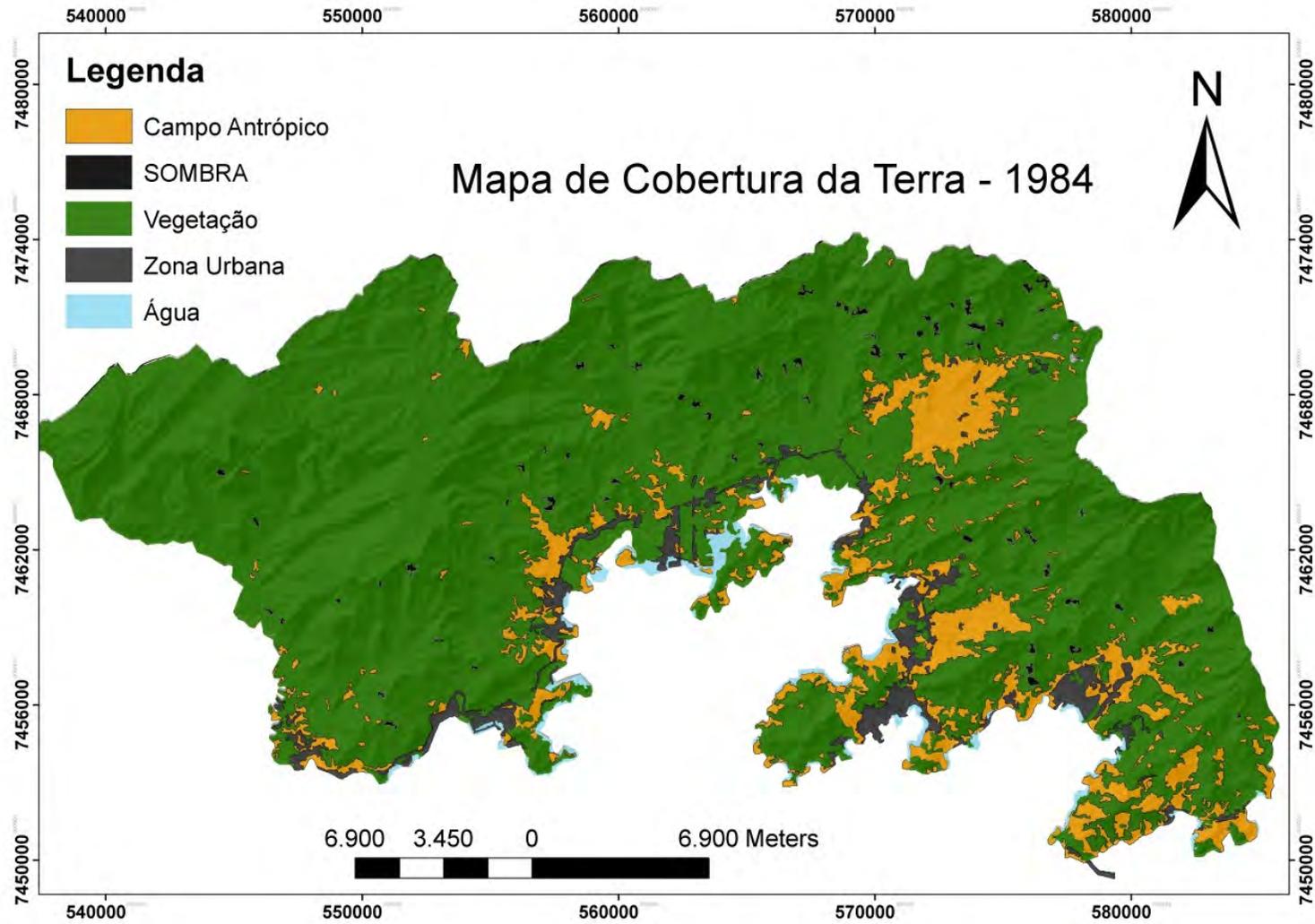
8. ANEXOS

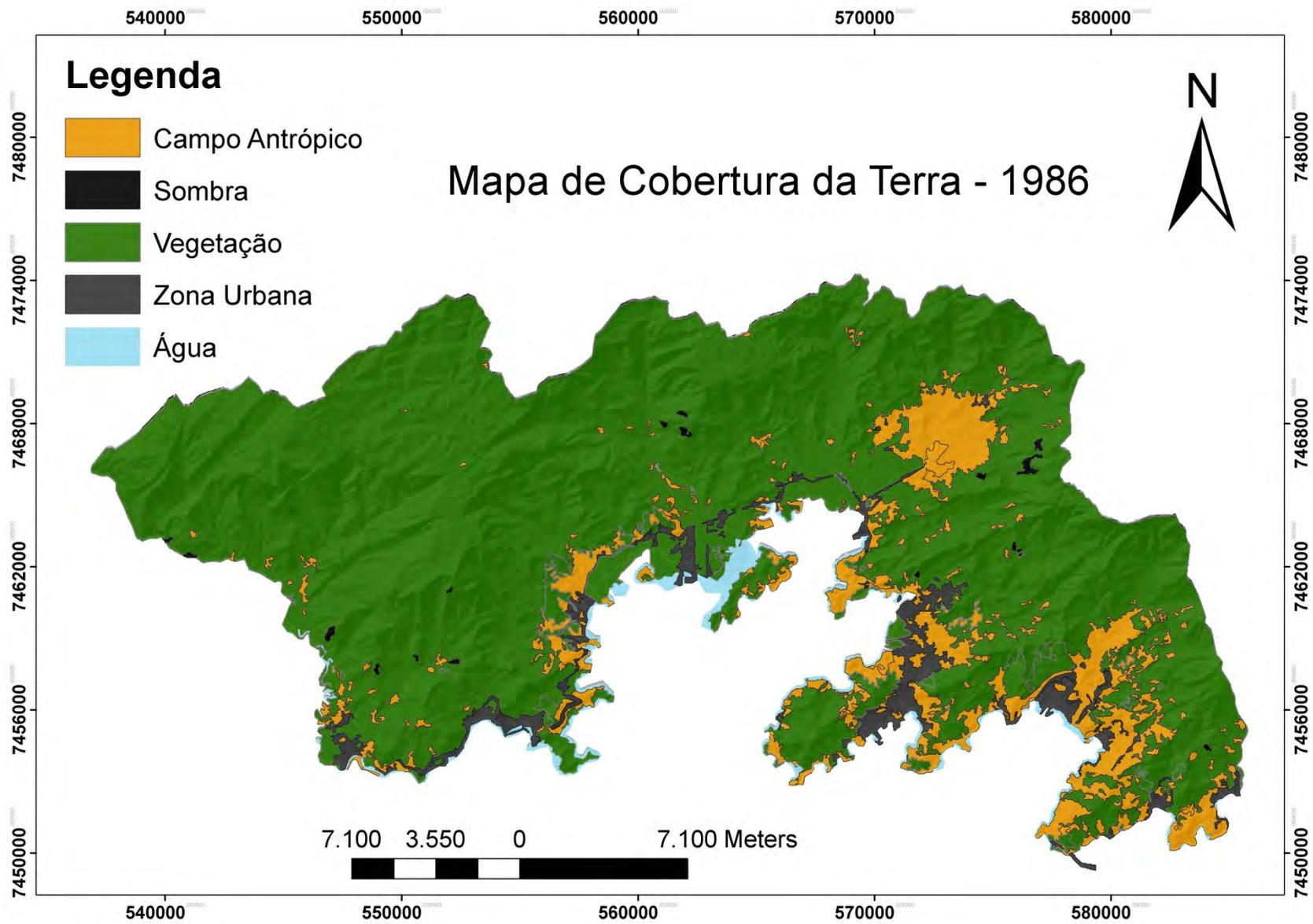
Anexo A – Descrição das unidades de mapeamento de Angra dos Reis-RJ.

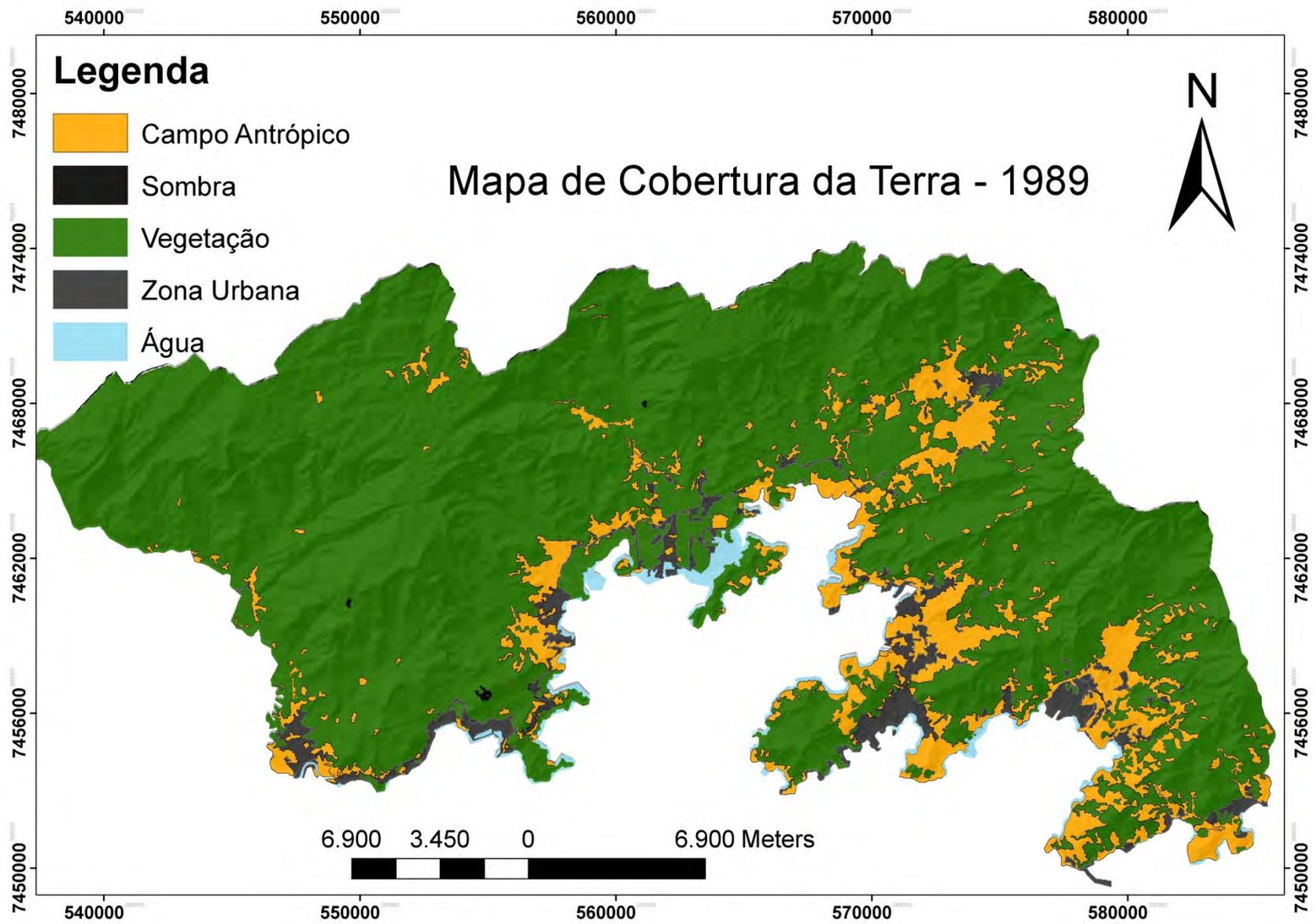
Unidades de Mapeamento	Descrição das unidades de mapeamento
PVAd1	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, textura média/argilosa, relevo ondulado a montanhoso com predomínio de encostas côncavas.
PVAd2	Argissolo Vermelho Distrófico típico, textura média/argilosa, relevo forte ondulado/Montanhoso fase rochosa com predomínio de encostas convexas.
PVAd3	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, relevo ondulado fase muito rochosa.
PVAd4	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico textura média/argilosa, relevo forte ondulado fase rochosa + Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico, textura media, relevo forte ondulado.
PVAd5	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, relevo montanhoso fase rochosa com predomínio de encostas côncavas
PVAd6	Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, relevo montanhoso com predomínio de encostas convexas.
PVAd7	Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, textura média/argilosa, relevo forte ondulado fase rochosa + Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, relevo montanhoso com predomínio de encostas côncavas.
PVAd8	Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, textura argilosa/muito argilosa, relevo montanhoso fase rochoso.
PVAd10	Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, textura argilosa argilosa, relevo forte ondulado com predomínio de encostas convexas.
CXbd1/	Cambissolo Háptico Tb distrófico típico, textura argilosa, relevo montanhoso fase rochosa.
CXa1	Cambissolo Háptico Alumínico típico, textura argilosa, relevo montanhoso fase rochosa.
CXbd2	Cambissolo Háptico Tb distrófico típico, textura argilosa relevo suave ondulado fase muito rochosa.
CXbd3	Cambissolo Háptico Tb distrófico típico, textura argilosa, raso relevo montanhoso + Neossolo Litólico Distrófico típico + Cambissolo Háptico Alumínico típico, textura argilosa relevo montanhoso.
CXbd4	Cambissolo Háptico Tb distrófico típico, textura argilosa, relevo forte ondulado fase rochosa + Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, textura argilosa /muito argilosa, relevo forte ondulado fase rochosa.
CXbd5	Cambissolo Háptico Tb distrófico típico, textura muito argilosa fase rochosa raso, relevo montanhoso + Neossolo Litólico Distrófico típico, relevo montanhoso.
RYbd1	Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico, textura indiscriminada, relevo suave ondulado.
RYbd 2	Complexo de solos formado por Neossolos flúvicos -Tb Distróficos típicos textura indiscriminada - Gleissolo Háptico Tb Distrófico típico.
RYbd 3	Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico, textura leve.
RYbd 4	Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico, textura indiscriminada, relevo plano.
RYbd 5	Complexo de solos formado por Neossolos flúvicos - Tb Distróficos típicos textura indiscriminada - Gleissolo Háptico Tb Distrófico típico, Textura indiscriminada.

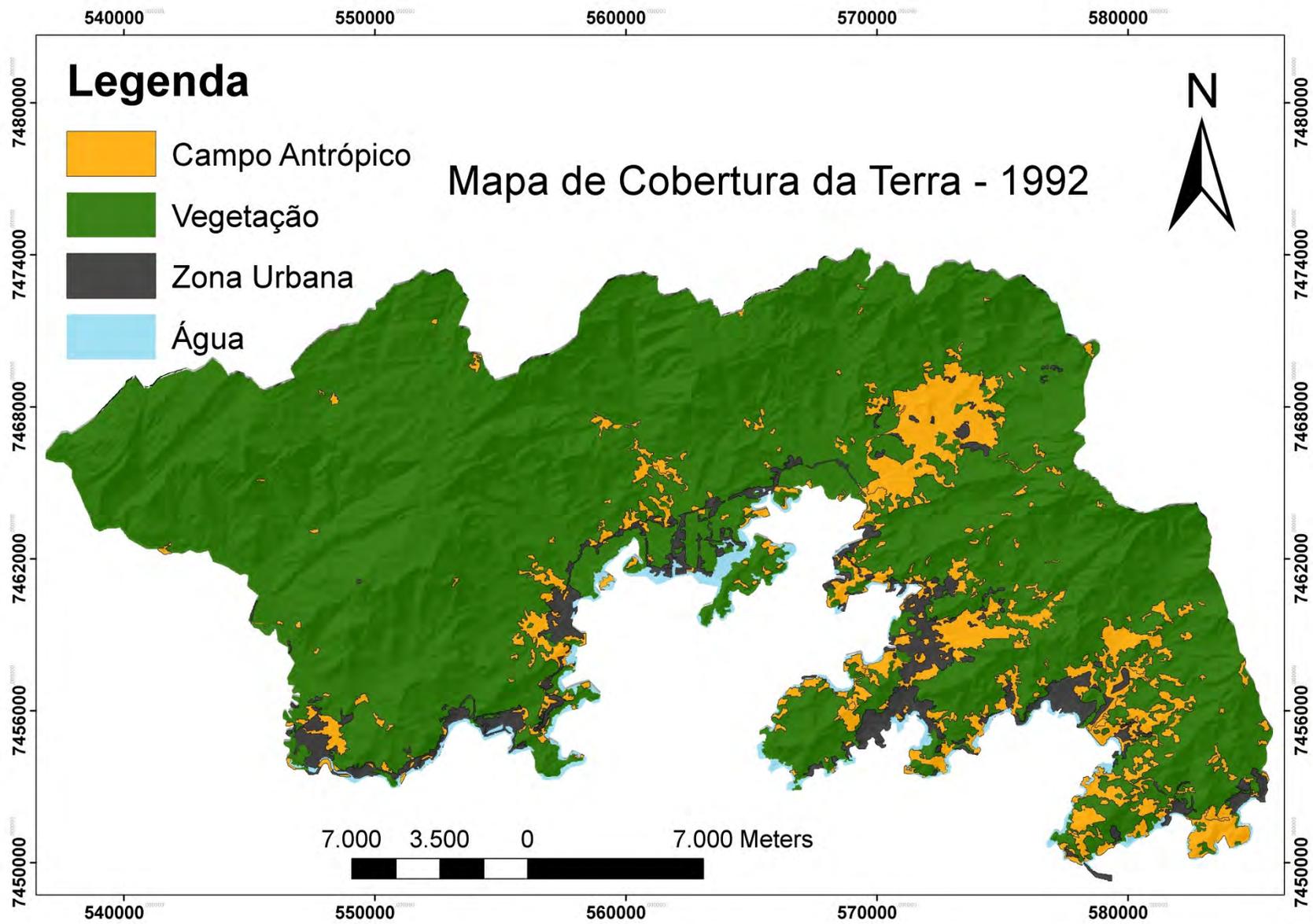
Unidades de Mapeamento	Descrição das unidades de mapeamento
RYbd 6	Neossolos flúvicos Tb Distróficos típicos, textura indiscriminada, textura indiscriminada + Gleissolo Háptico Tb Disrótico típico.
RYbd8	Neossolos flúvicos Tb Distróficos típicos, textura indiscriminada pedregoso.
GMbd1	Gleissolo Melânico Tb Distróficos
GXbd1	Gleissolo Háptico Tb Disrótico típico
GXbd2	Gleissolo Háptico Tb Disrótico típico
GXbdt	Gleissolo Háptico Tb Disrótico típico Gleissolo tiomórfico húmico típico + Gleissolo Háptico Tb Disrótico típico
GZo	Gleissolo Sáfico Órticos típicos.
GZoi	Gleissolo Sáfico Órticos típicos, muito mal drenado e sujeito a inundação.
RQo	Neossolo Quartzarênico Órtico típico.
RQo1	Neossolo Quartzarênico Órtico típico.
RLd	Neossolo Litólico Distrótico típico.

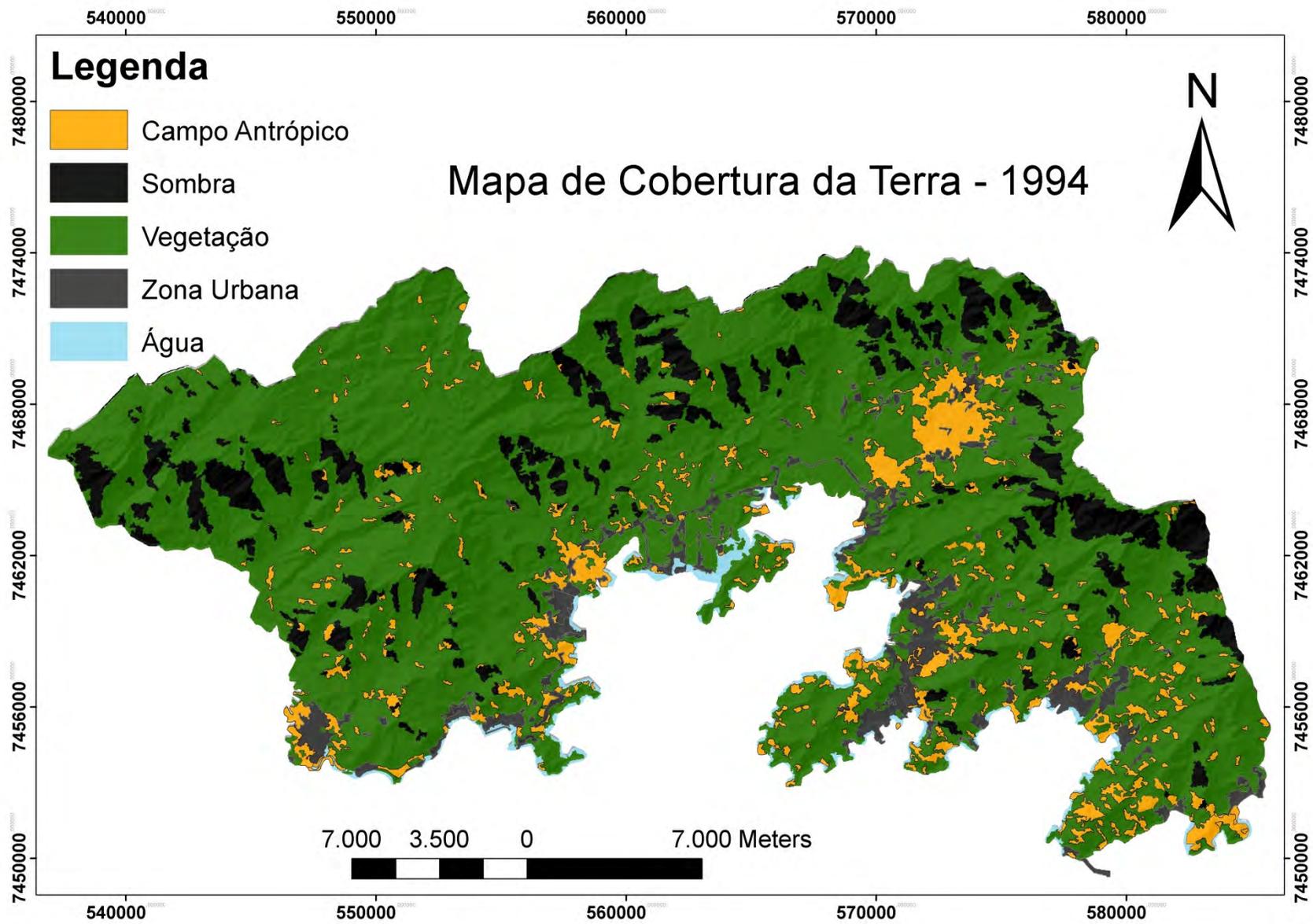
Anexo B – Mapas de cobertura de terra de 1984 á 2014.

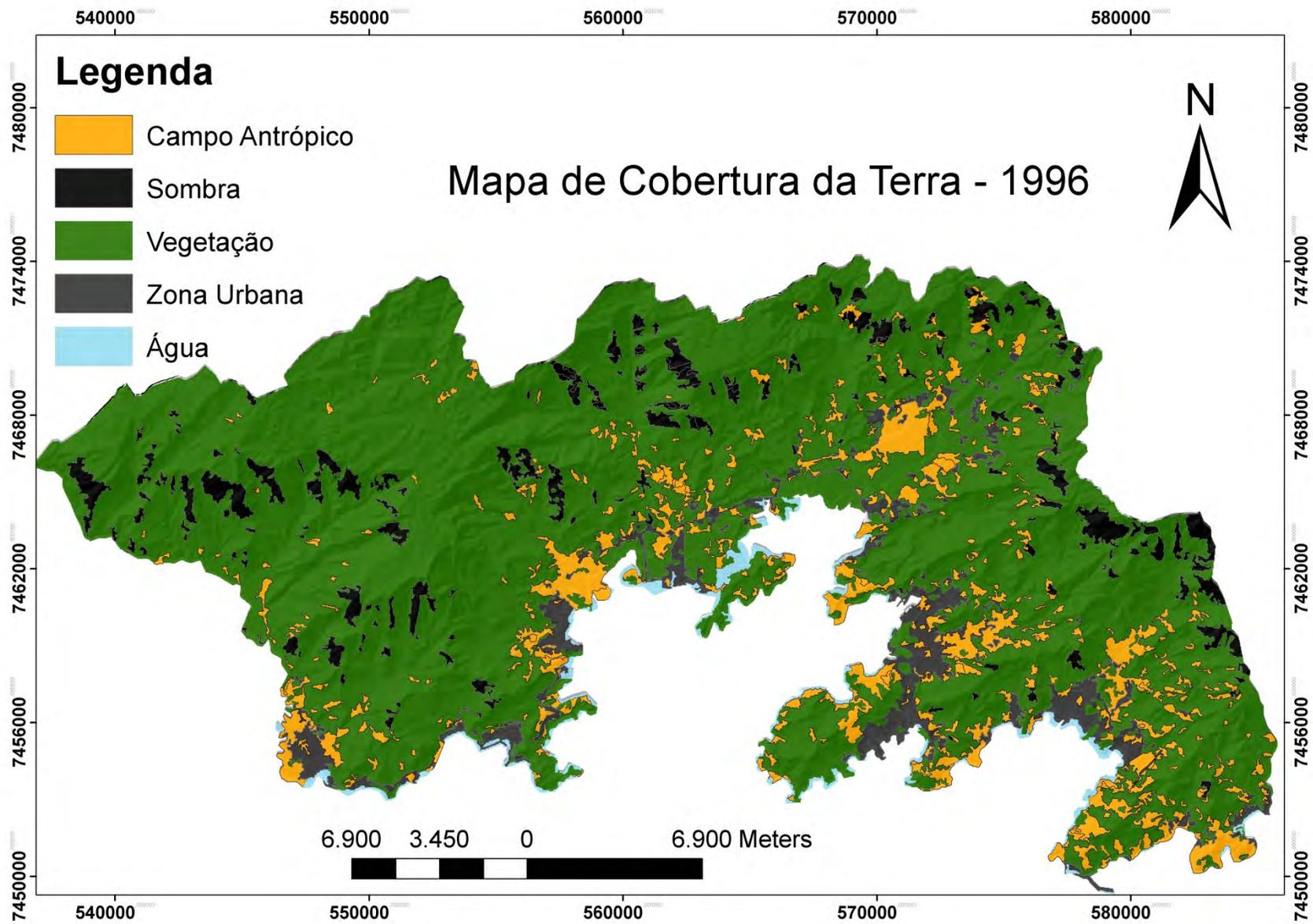


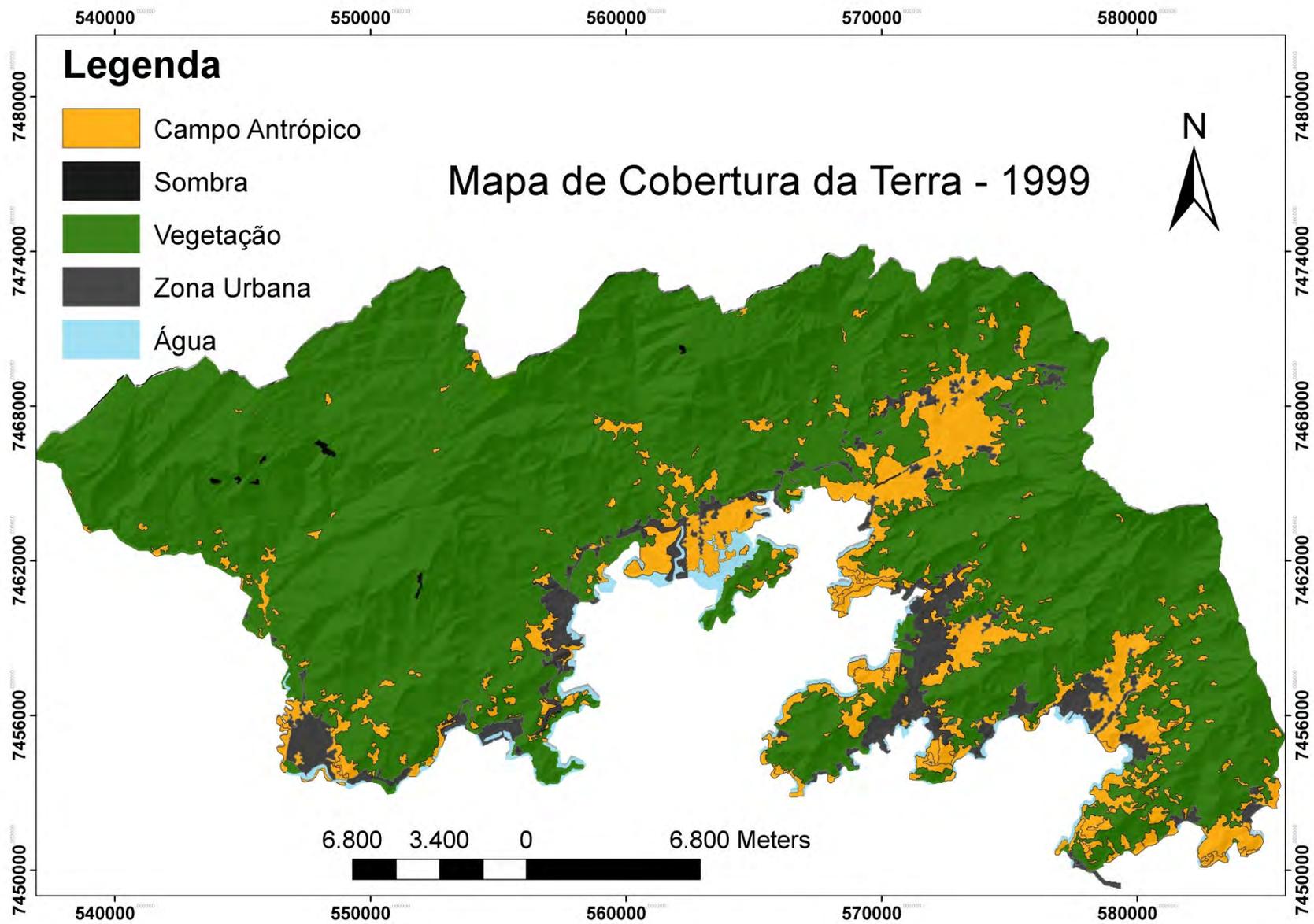


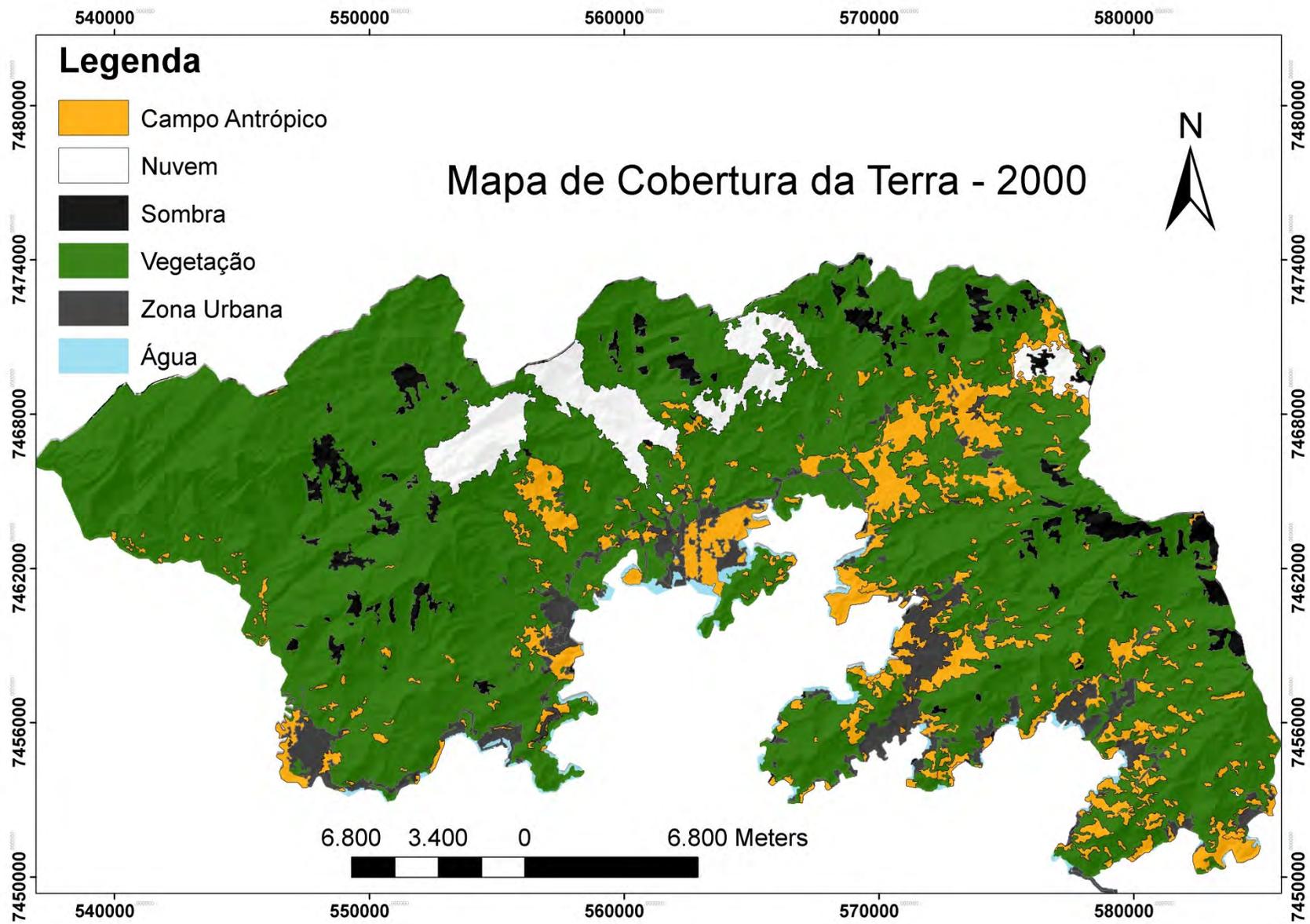


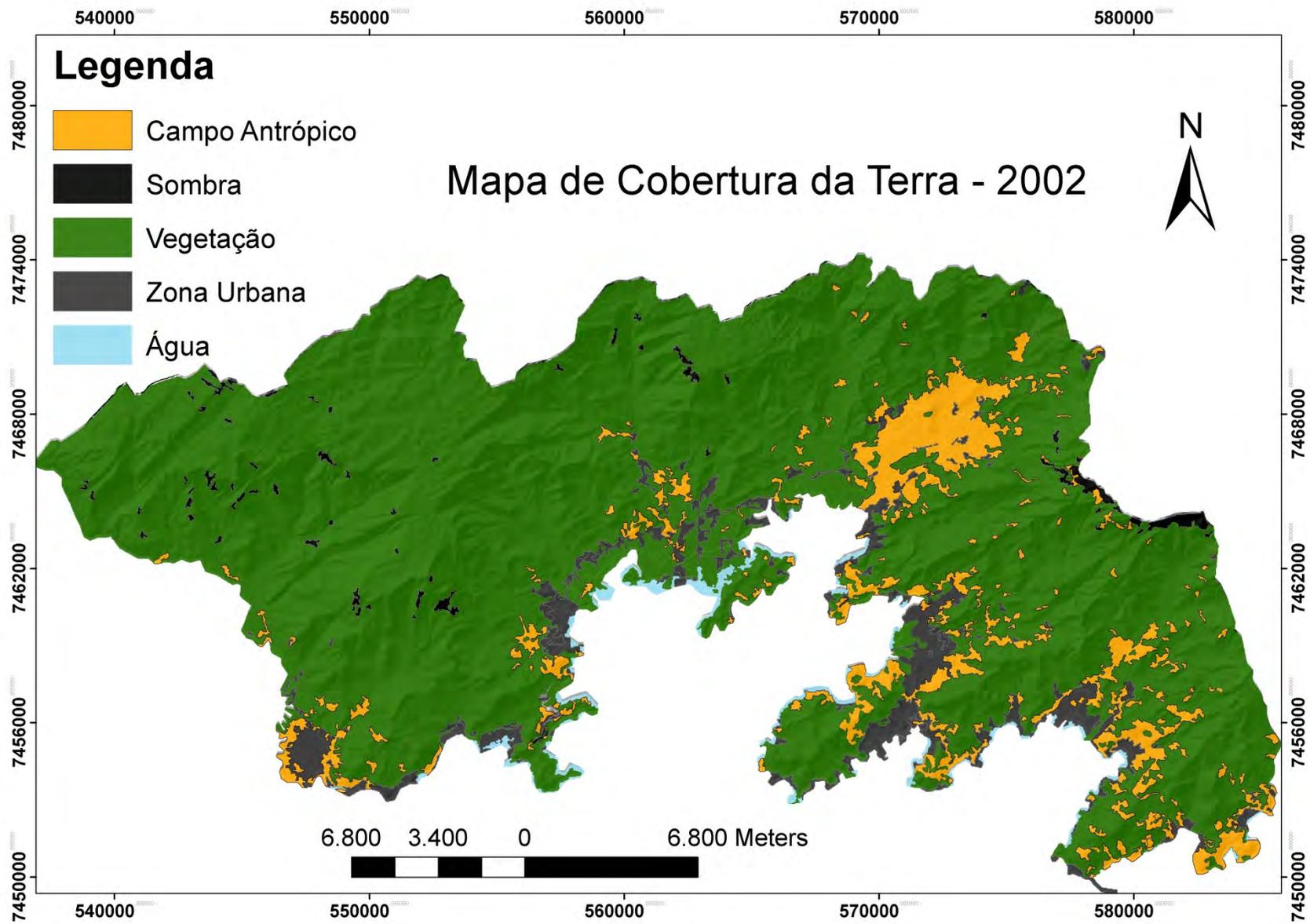


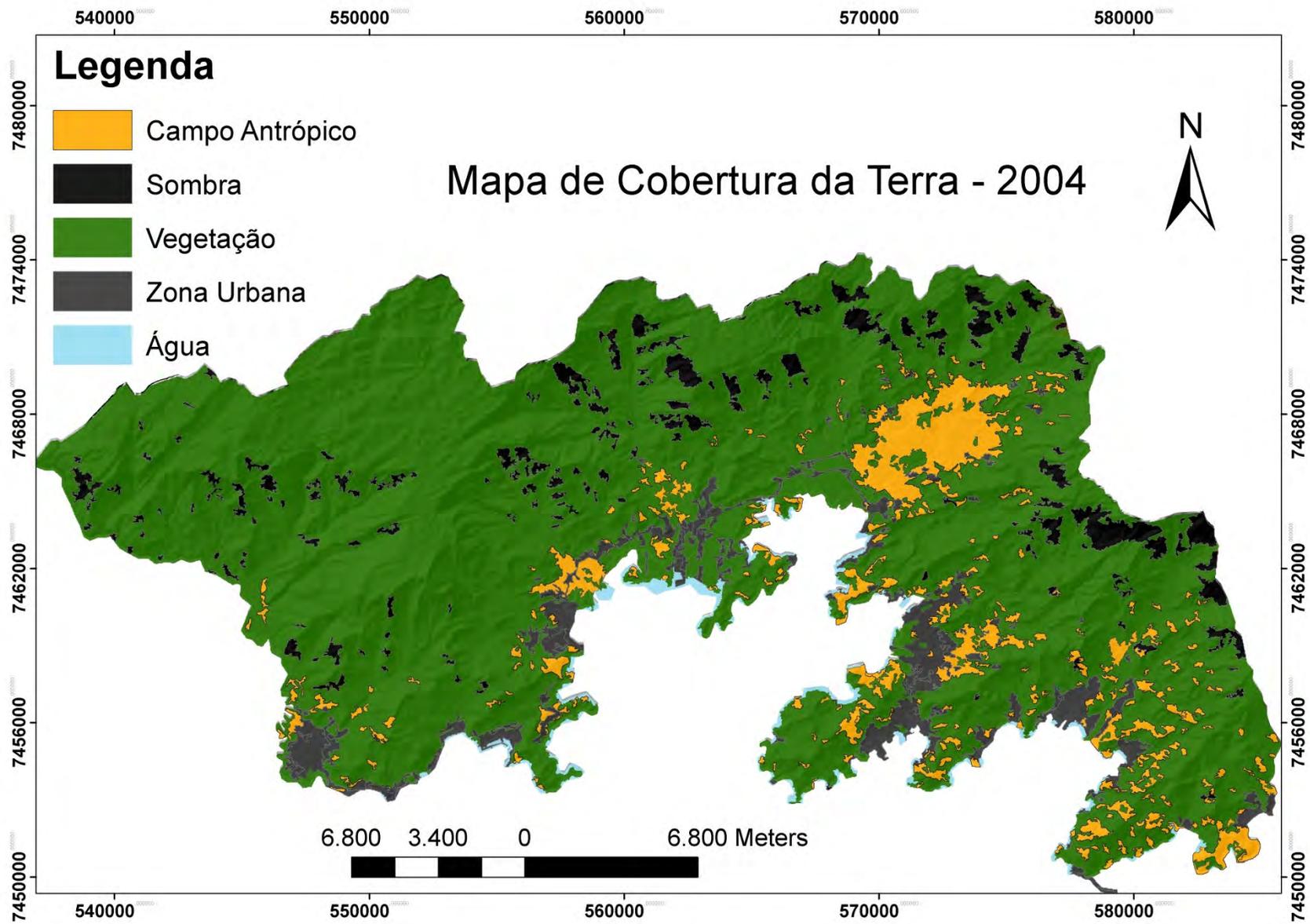


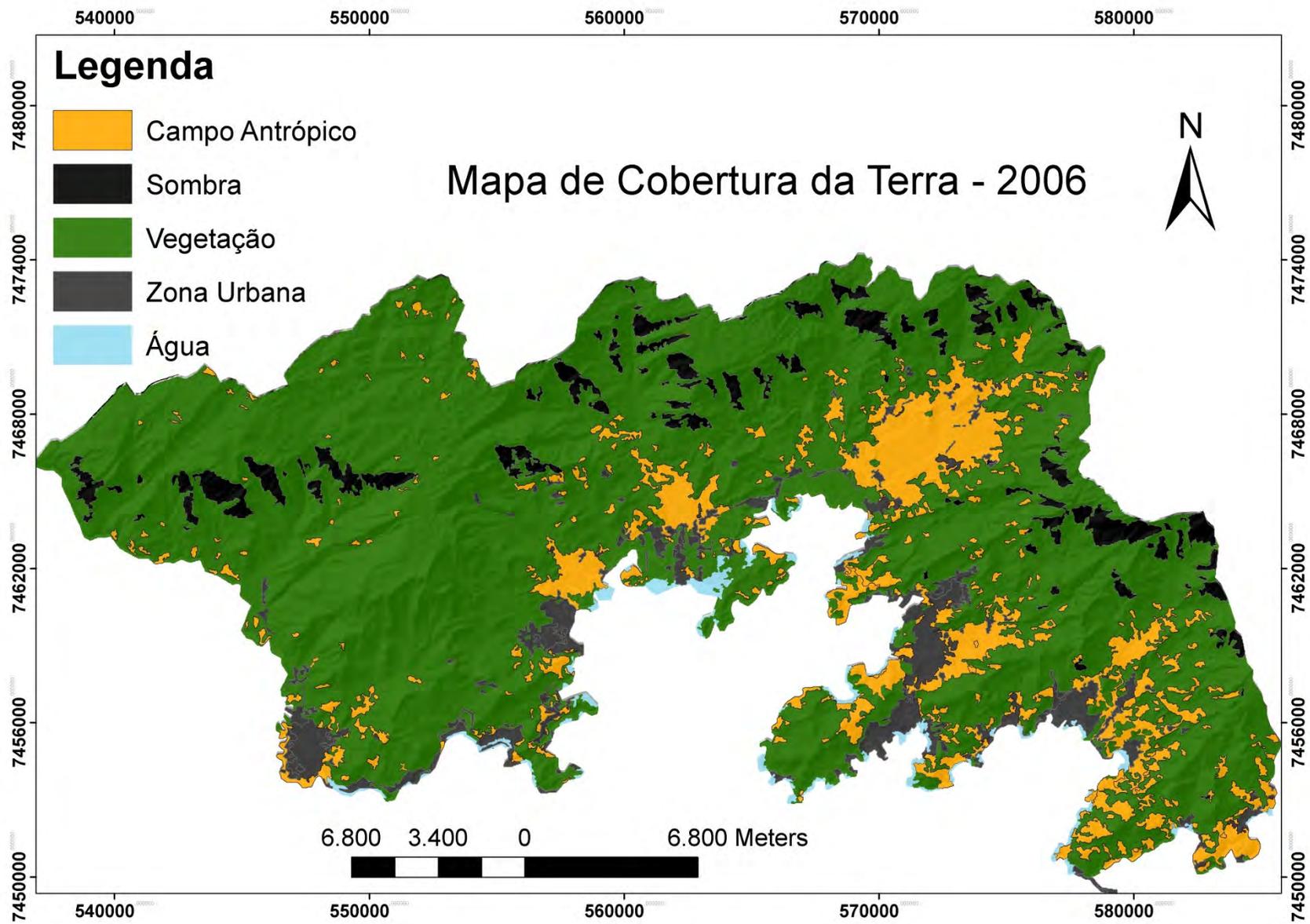


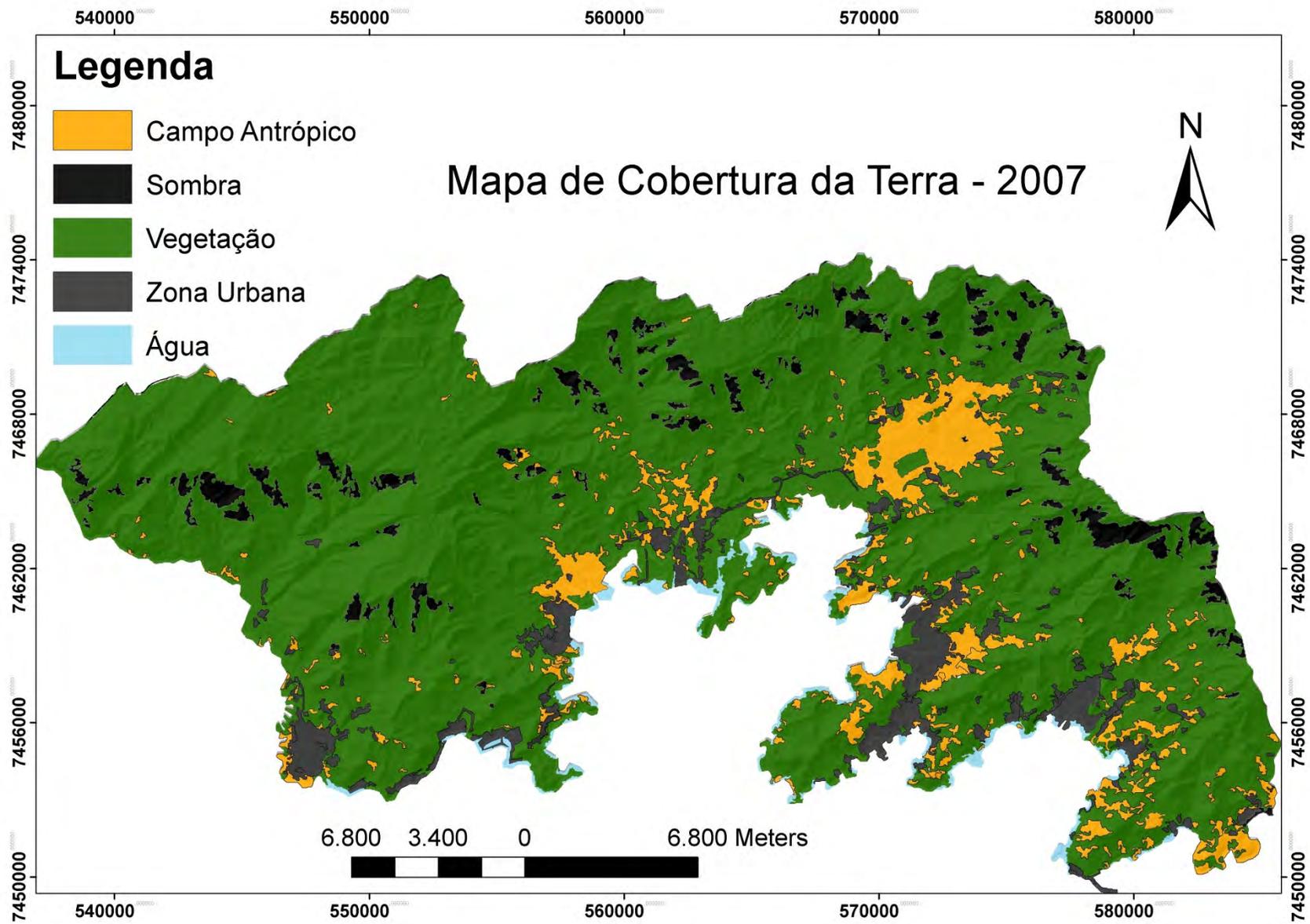


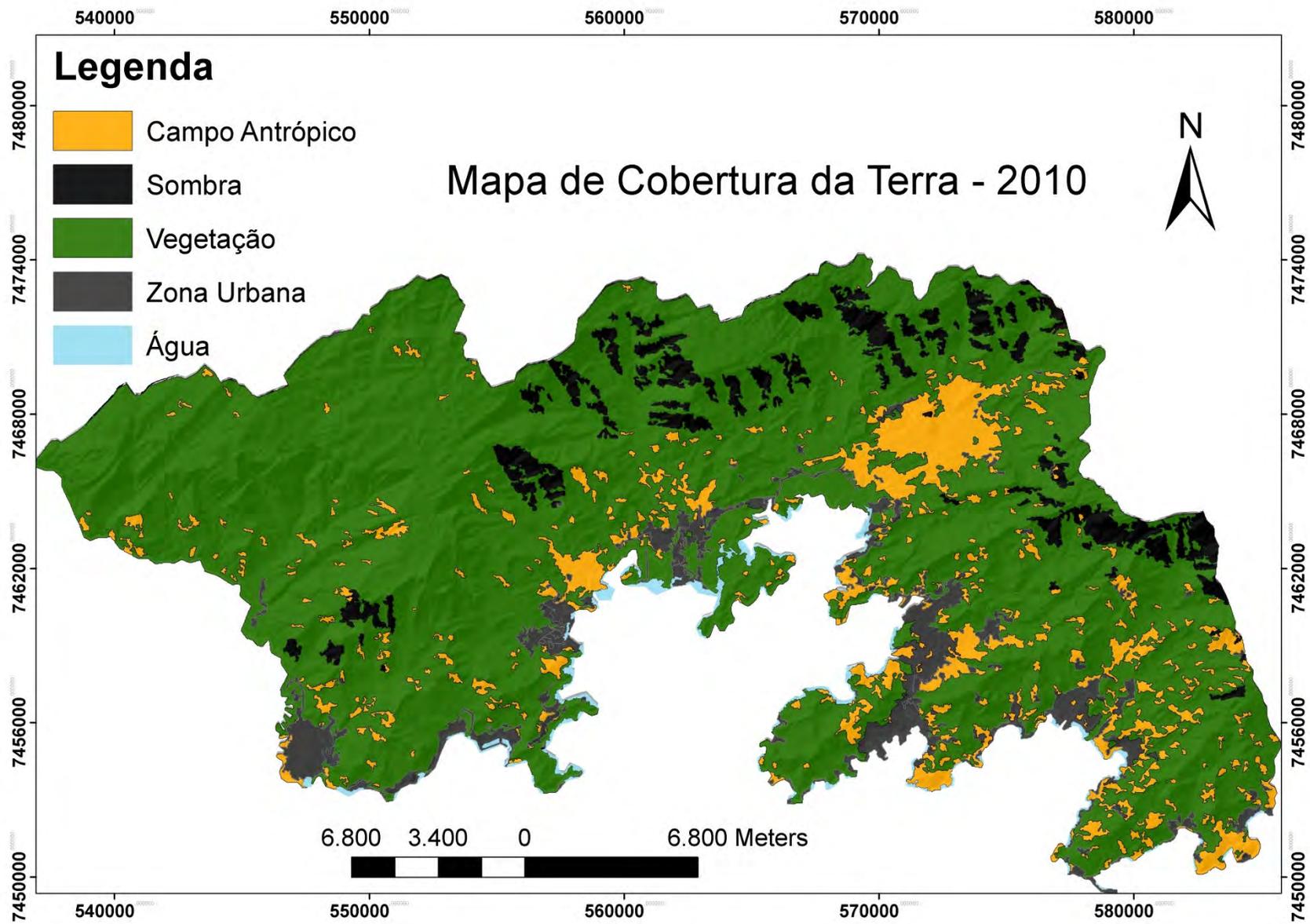


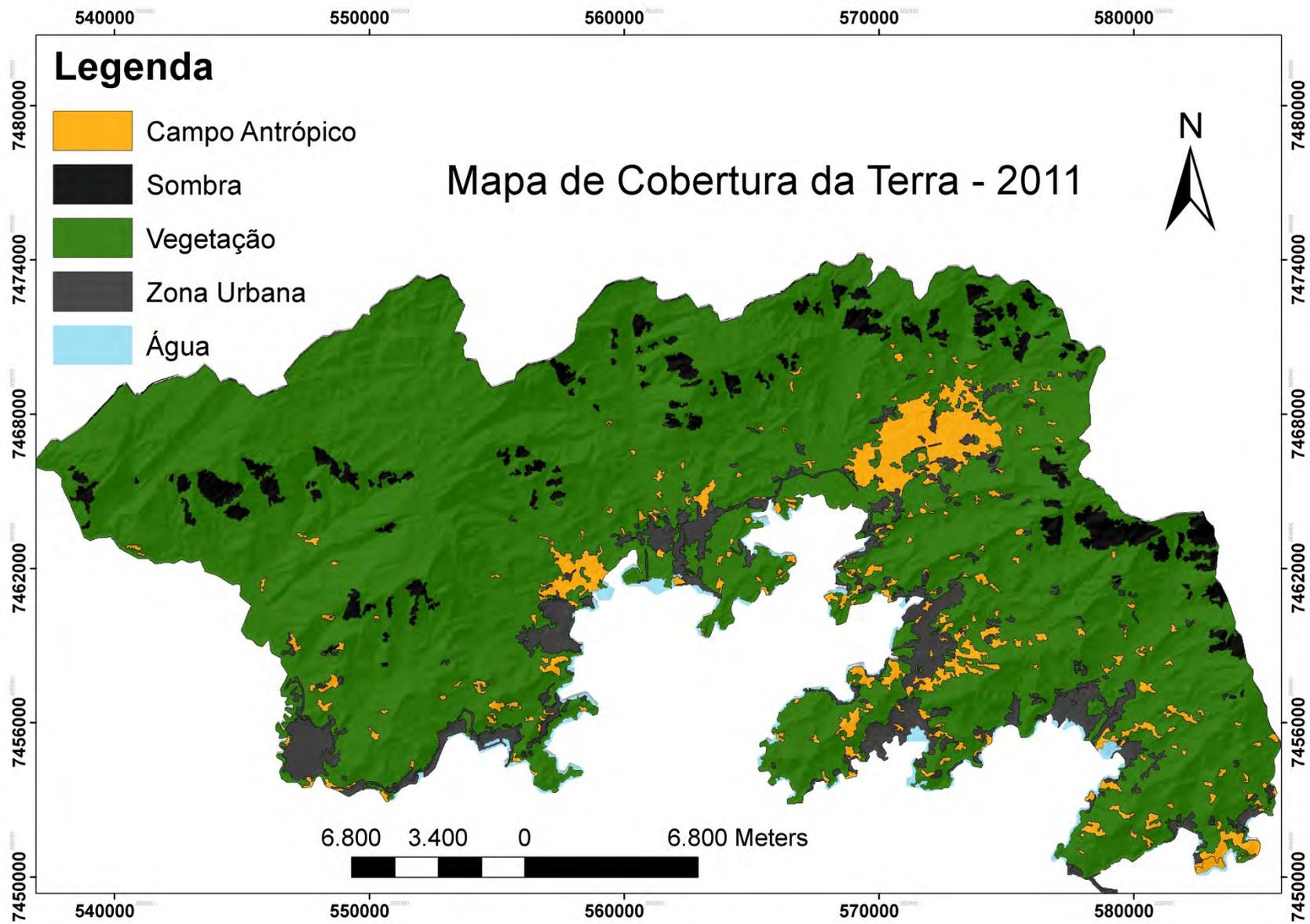


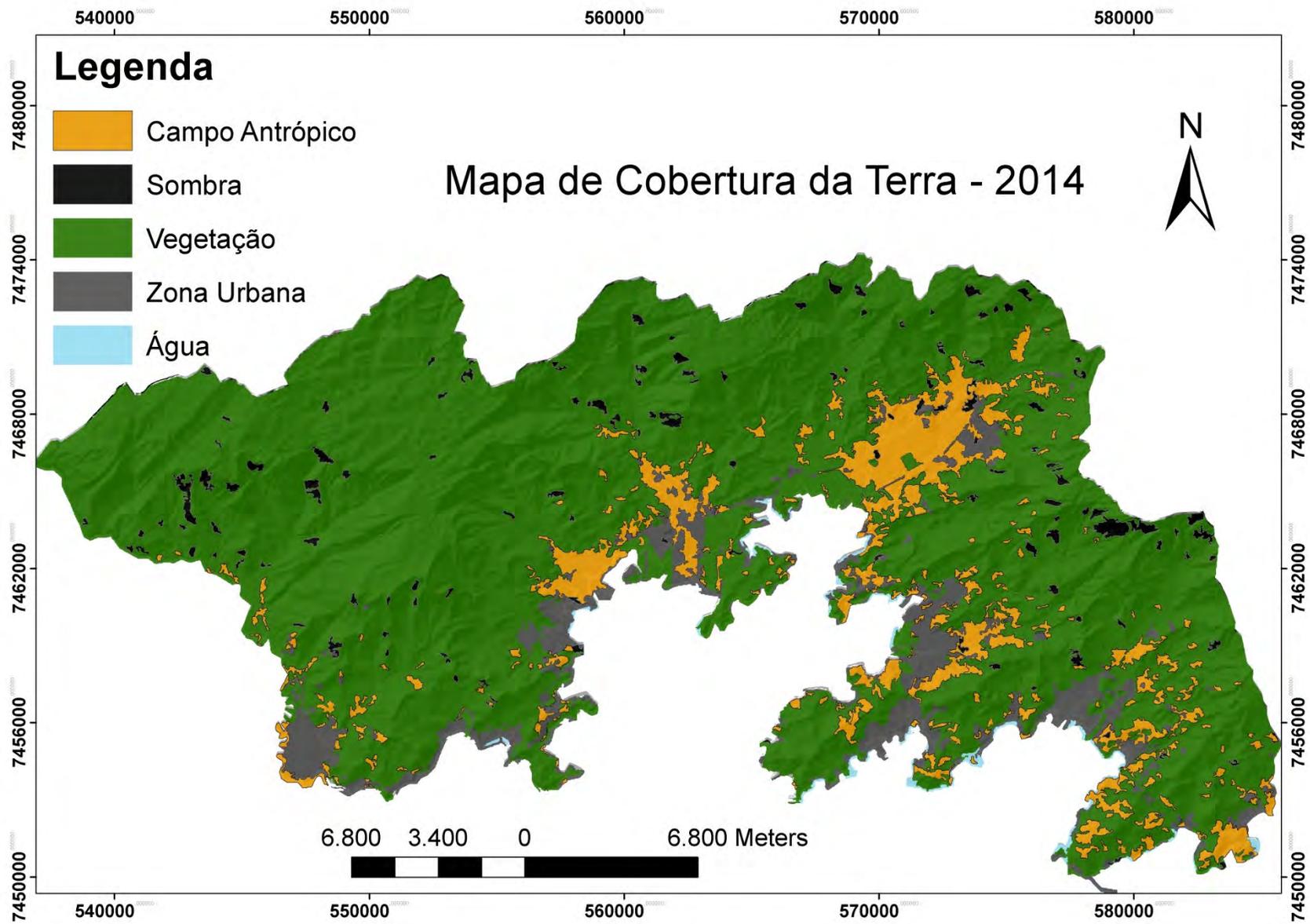




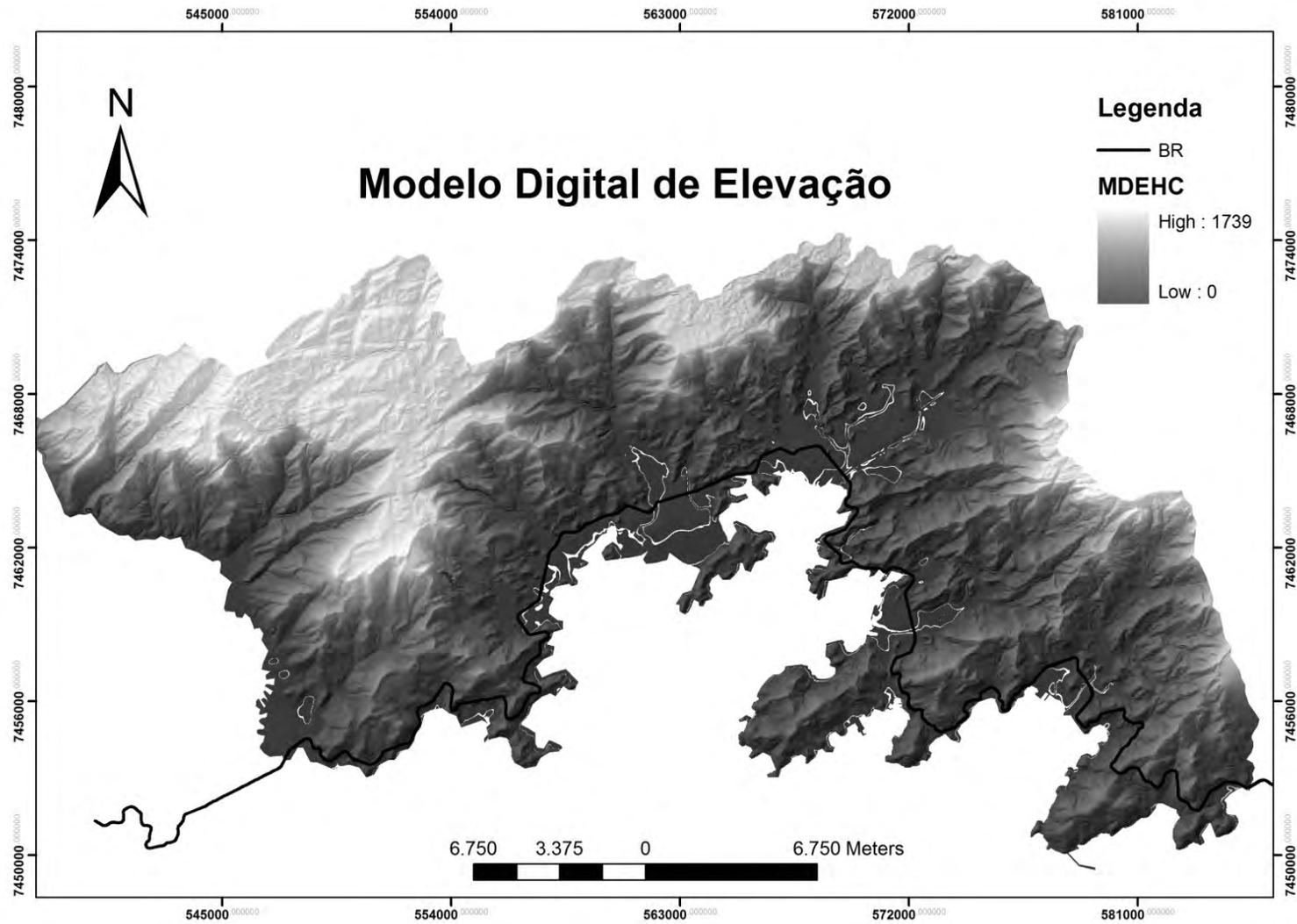


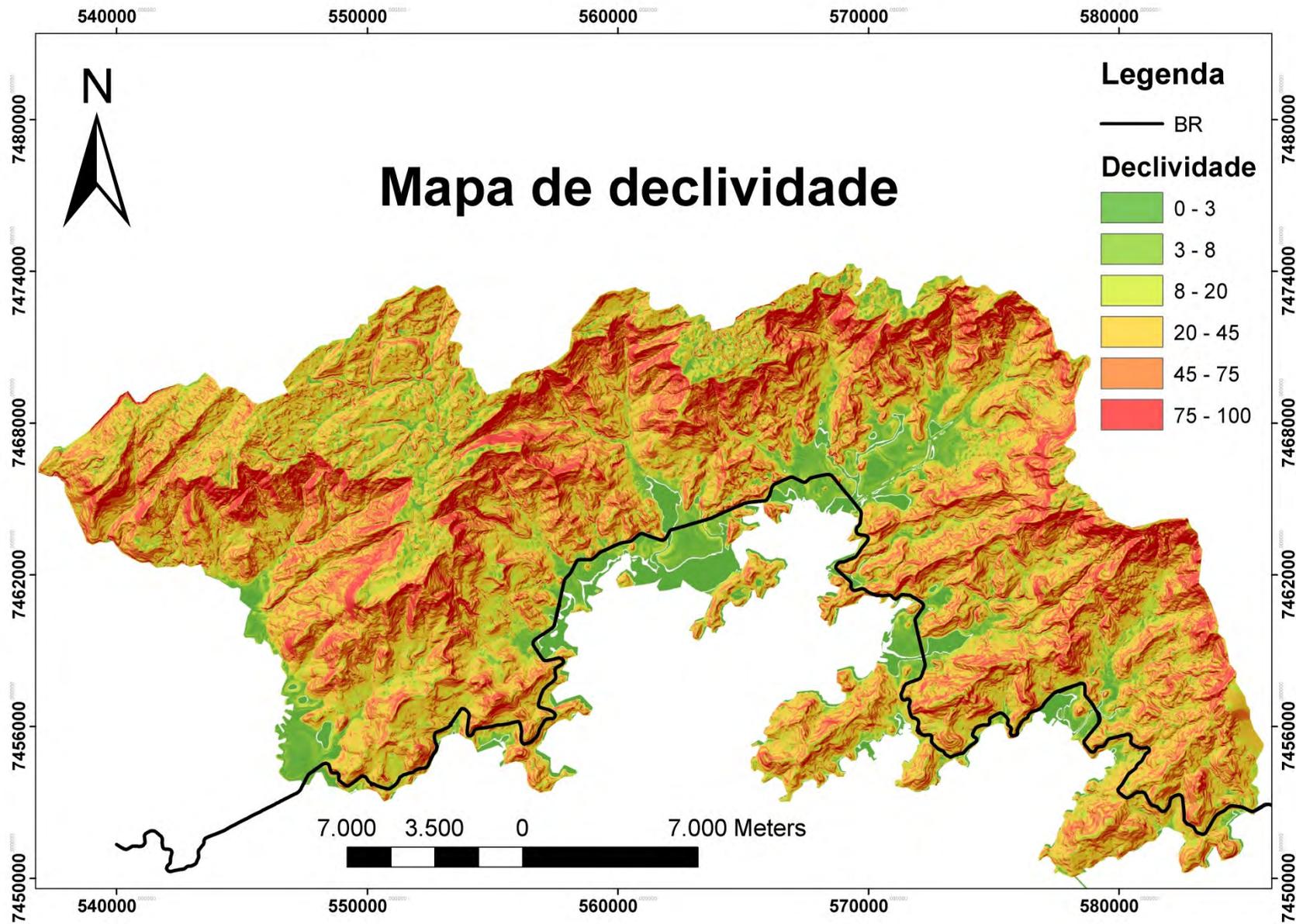


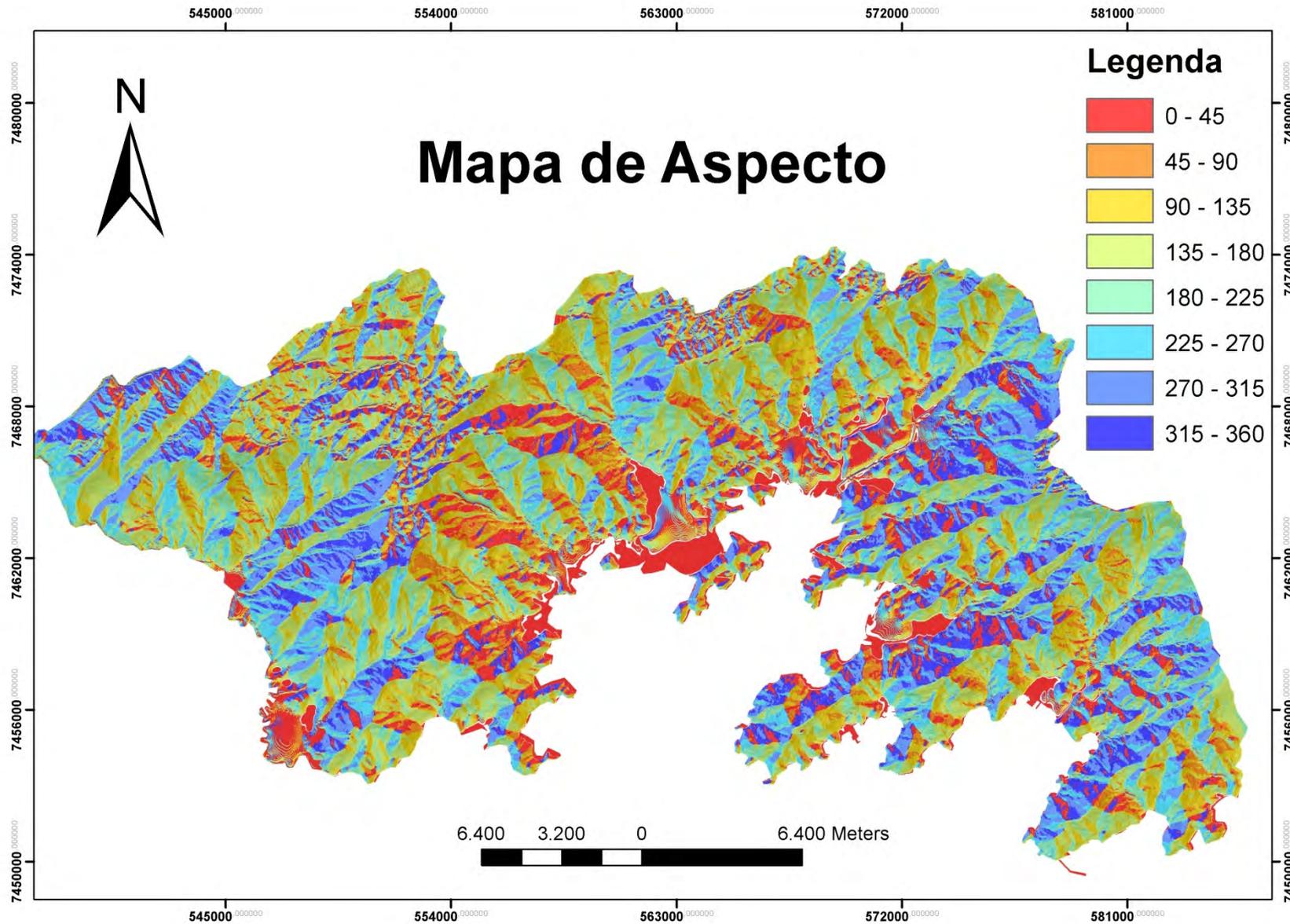


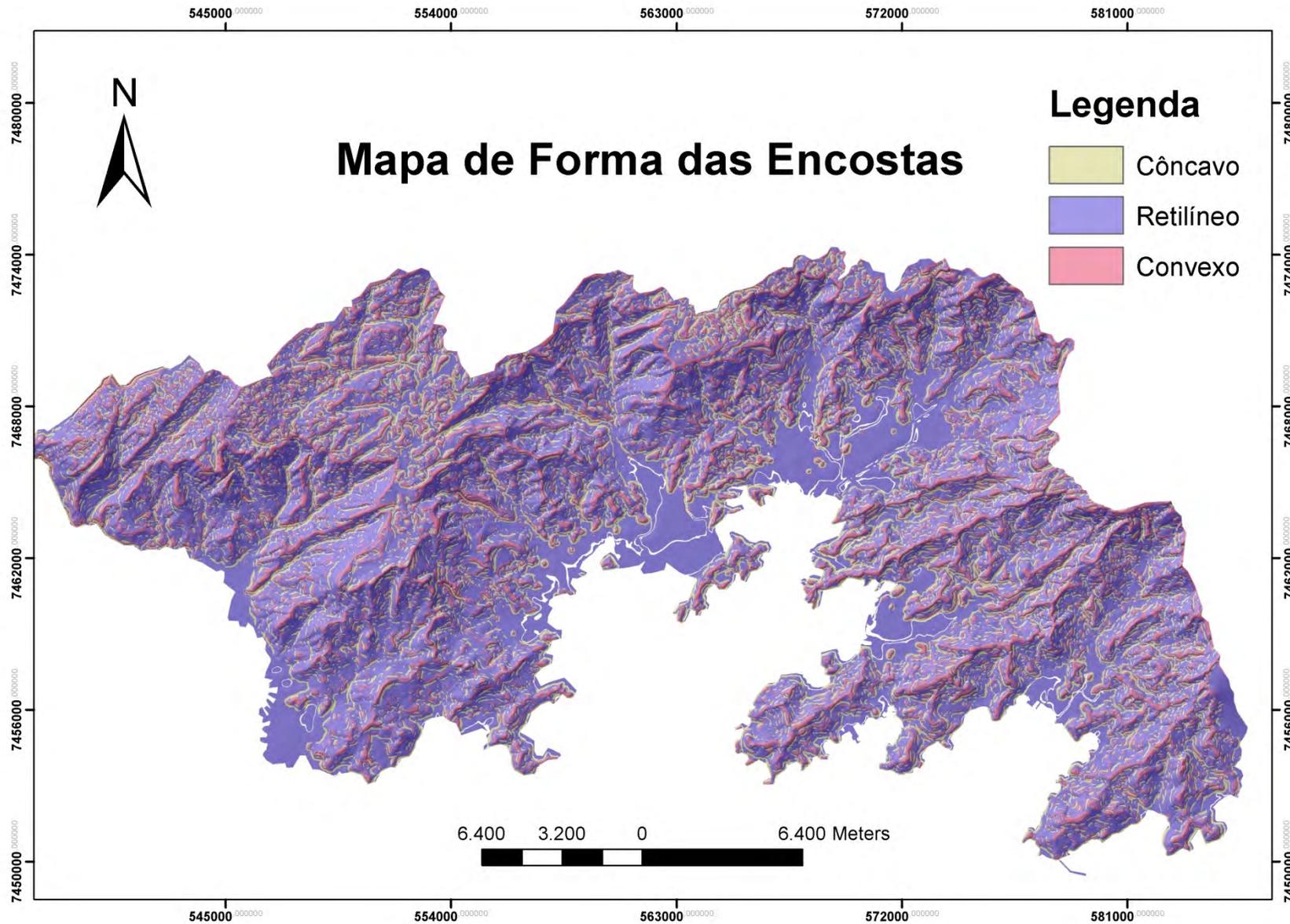


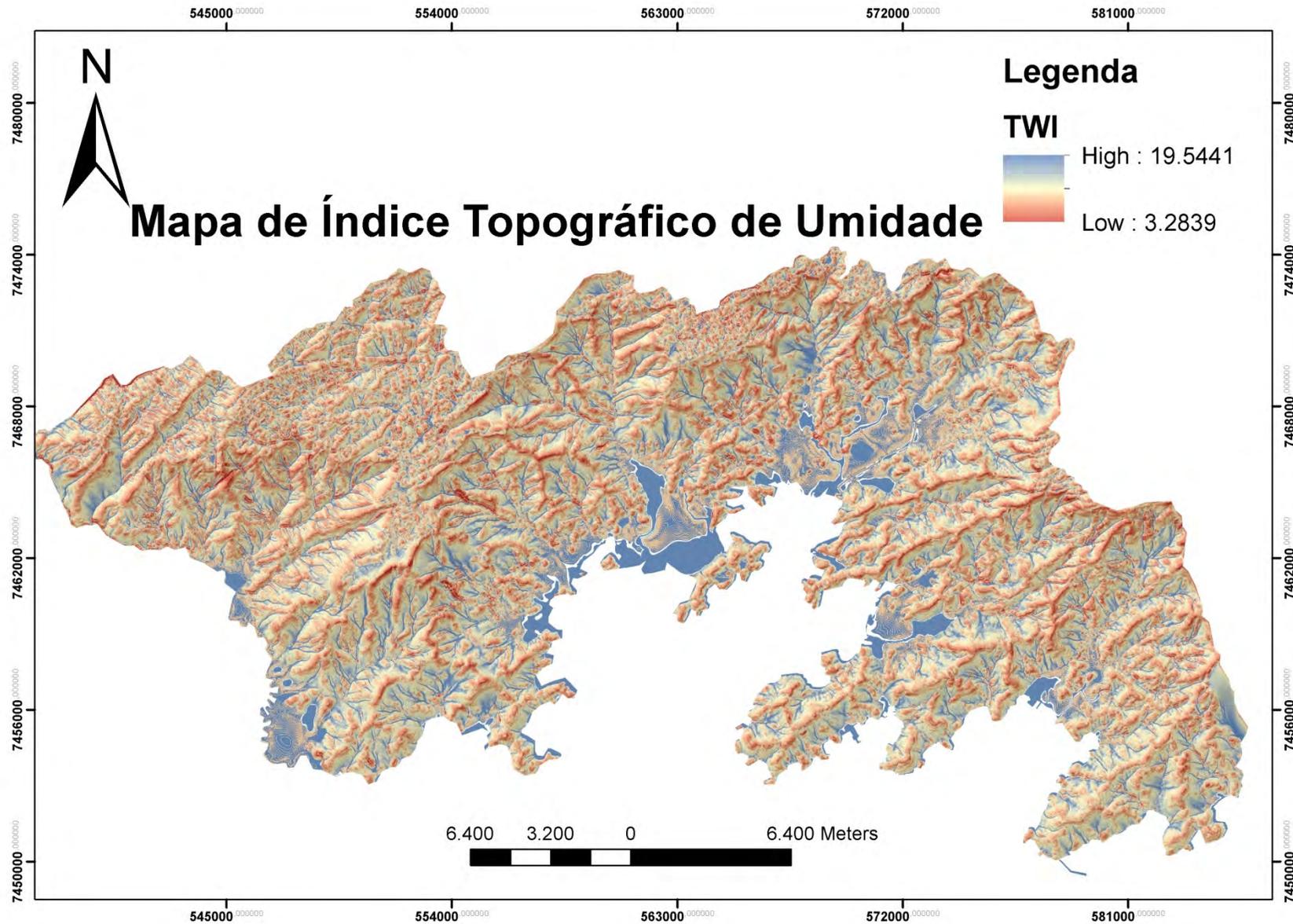
Anexo C – Mapa do modelo digital de elevação e seus atributos extraídos do mesmo.











Anexo D – Contribuições absolutas das colunas ativas nos eixos 1, 2, 3, 4, 5, e 6.

Id	1	2	3	4	5	6
U1	1,63	0,834	0,184	36,338	48,445	2,124
UCM	0,882	0,547	38,826	13,953	16,38	7,212
U3C	3,885	16,683	0,216	0,816	5,939	3,871
U4Z	0,018	52,24	5,34	1,508	1,019	11,754
I1	7,874	6,54	5,019	3,295	11,795	5,088
I2	5,102	1,047	0,208	0,501	0	0,002
I6	7,654	0,259	0,15	19,726	6,793	1,758
C1	3,268	13,55	13,181	14,621	4,547	18,906
C2	4,108	5,485	2,108	1,272	0,514	21,537
C3	4,143	0,604	33,492	2,125	0,365	17,768
TWI1	17,199	0,226	0,199	0,588	1,369	2,543
TWI2	1,741	0,118	0,054	0,334	0,081	0,327
TWI3	20,607	1,578	0,768	4,174	1,011	3,874
TWI4	21,889	0,288	0,253	0,749	1,742	3,236

Anexo E – Coordenadas das colunas ativas das variáveis condicionantes nos eixos 1, 2, 3, 4, 5, e 6.

Id	Massa	Dist. Origem	1	2	3	4	5	6
U1	0,005	42,733	1,174	0,664	-0,309	-4,044	4,576	-0,934
UCM	0,012	17,267	0,546	-0,34	2,836	1,585	1,683	1,088
U3C	0,166	0,495	-0,309	0,506	-0,057	-0,103	-0,273	0,215
U4Z	0,054	3,366	0,037	-1,561	-0,494	0,245	0,197	-0,653
I1	0,017	11,013	1,379	0,994	-0,862	0,651	1,207	0,773
I2	0,206	0,191	-0,317	-0,113	0,05	0,072	0	0,005
I6	0,019	9,236	1,272	0,185	0,14	-1,49	-0,857	-0,425
C1	0,042	4,405	0,565	-0,909	0,888	-0,871	-0,476	0,947
C2	0,158	0,536	-0,324	0,296	0,182	0,132	0,082	-0,518
C3	0,051	3,411	0,573	-0,173	-1,275	0,299	0,122	0,827
TWI1	0,009	10,905	2,817	0,255	0,237	0,38	-0,568	-0,755
TWI2	0,233	0,054	-0,174	-0,036	-0,024	-0,056	0,027	0,053
TWI3	0,017	9,231	2,231	0,488	0,337	0,733	-0,353	-0,674
TWI4	0,011	10,905	2,817	0,255	0,237	0,38	-0,568	-0,755